

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů**



**Hodnocení tvařitelnosti tenkých plechů při  
vysokých rychlostech deformace**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Michal Gult**

**2009**

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Strojírenská technologie  
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

**Hodnocení tvařitelnosti tenkých plechů při vysokých rychlostech deformace**

**Evaluation of thin metal sheet formability under high strain-rates**

Michal Gult

**KSP – TP – B54**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Sobotka – TU v Liberci

### **Rozsah práce a příloh:**

<b>Počet stran</b>	50
<b>Počet tabulek</b>	07
<b>Počet příloh</b>	02
<b>Počet obrázků</b>	25
<b>Počet vzorců</b>	16

**Datum:** 5. 6. 2009

**ANOTACE**  
**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**  
**Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Michal Gult

Téma práce: **Hodnocení tvařitelnosti tenkých plechů při vysokých rychlostech deformace**  
**Evaluation of thin metal sheet formability under high strain-rates**

Číslo BP: KSP – TP – B54

Vedoucí BP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant BP: Ing. Jiří Sobotka – TU v Liberci

**Abstrakt:**

Bakalářská práce se zabývá zkoušením mechanických vlastností tenkých plechů při vyšších rychlostech deformace. V práci se nejprve zjišťují mechanické vlastnosti pomocí statické zkoušky tahem, dále při rychlostech zatěžování 2,5 a 2,8 m/s. Cílem práce je vyhodnocení vlivu rychlostí deformace na mechanické vlastnosti materiálů.

**Abstract:**

Bachelor thesis deals with the testing of mechanical properties of thin metal sheet under high strain-rates. Firstly in this work are measured materials mechanical properties by means of static tensile test. Then tensile test is carried out at speeds 2.5 and 2.8 m/s. The aim of this work is to evaluate the influence of strain-rate on the materials mechanical properties.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. června 2009

.....  
Michal Gult  
Velké Poříčí 176  
54932 Velké Poříčí

## **Poděkování**

Velmi rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné připomínky, a za poskytnutí podkladů při vypravování zvoleného tématu. Dále bych poděkoval ostatním pracovníkům Katedry strojírenské technologie z Oddělení tváření kovů a plastů za poskytnutou pomoc, cenné rady a informace.

Na konec bych chtěl poděkovat mým rodičům za trpělivost a podporu během celého mého studia.

Michal Gult



# OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>- 11 -</b>
2.1. TVAŘITELNOST KOVŮ A SLITIN.....	- 11 -
2.1.1. Základní typy a podstata deformací .....	- 11 -
2.1.1.1. <i>Deformace elastická</i> .....	- 11 -
2.1.1.2. <i>Deformace plastická</i> .....	- 12 -
2.1.2. Stroje pro měření tvařitelnosti.....	- 12 -
2.2. TVÁŘENÍ VYSOKÝMI PARAMETRY .....	- 13 -
2.2.1. Průběh pracovního diagramu za vyšších rychlostí deformace.....	- 13 -
2.2.2. Deformační odpor při vysokých rychlostech deformace .....	- 14 -
2.2.3. Setrvačné síly při tváření vysokými parametry.....	- 15 -
2.2.4. Fyzikální podstata procesu zpevňování při vysokých rychlostech deformace, pohyb dislokací a procesy brždění.....	- 16 -
2.3. MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOVŮ .....	- 18 -
2.3.1. Statická zkouška tahem.....	- 18 -
2.3.2. Zkouška tlakem .....	- 22 -
2.3.3. Zkouška krutem.....	- 22 -
2.3.4. Zkouška ohybem .....	- 22 -
2.3.5. Zkouška vrubové houževnatosti.....	- 23 -
2.3.6. Zkouška přechovací.....	- 23 -
2.3.7. Zkoušky bariérové.....	- 23 -
2.4. PLECHY POUŽÍVANÉ PŘI KONSTRUKCI KAROSÉRIÍ.....	- 24 -
2.4.1. Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem .....	- 24 -
2.4.2. Pevnostní oceli .....	- 25 -
2.4.2.1. <i>Plechý z IF ocelí bez intersticií</i> .....	- 25 -
2.4.2.2. <i>Plechý z IF ocelí vykazující BH efekt</i> .....	- 25 -
2.4.3. Vysokopevnostní oceli .....	- 25 -
2.4.3.1. <i>Plechý z DP ocelí</i> .....	- 25 -
2.4.3.2. <i>Plechý z TRIP ocelí</i> .....	- 25 -
2.4.3.3. <i>Plechý z TWIP ocelí</i> .....	- 25 -
2.4.3.4. <i>Plechý z CP ocelí</i> .....	- 26 -
2.4.3.5. <i>Plechý z MS ocelí</i> .....	- 26 -



<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>- 27 -</b>
3.1. URČENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ZKOUŠENÉHO MATERIÁLU .....	- 28 -
3.1.1. Statická zkouška tahem .....	- 28 -
3.2. MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PŘI VYŠŠÍCH RYCHLOSTECH DEFORMACE .....	- 30 -
3.2.1. Příprava měření .....	- 30 -
3.2.2. Popis měřicího zařízení .....	- 31 -
3.2.3. Průběh měření .....	- 32 -
3.2.4. Měření při různých rychlostech zatížení pro materiál Al 6060.....	- 36 -
3.2.5. Měření při různých rychlostech zatížení pro materiál DX54 DZ100	- 38 -
3.2.6. Měření při různých rychlostech zatížení pro materiál DC05B SBV – 15 .....	- 40 -
3.2.7. Měření při různých rychlostech zatížení pro materiál H180 BD+Z ..	- 42 -
<b>4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>- 44 -</b>
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>- 49 -</b>
<b>7. SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>- 50 -</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení:	Jednotka:	Význam:
$A_x, A_{80\text{ mm}}$	%	tažnost
$c$	$\text{s}^{-1}$	rychlost deformace
$C$	-	koeficient monotónního zpevnění
$d$	m	průměr
$E$	MPa	modul pružnosti v tahu
$E_k$	J	kinetická energie
$F$	N	síla
$F_{eH}$	N	síla odpovídající horní mezi kluzu
$F_{eL}$	N	síla odpovídající dolní mezi kluzu
$F_m$	N	síla odpovídající mezi pevnosti
$g$	$\text{m.s}^{-2}$	gravitační zrychlení
$h$	m	výška
$k$	-	koeficient zaplnění plochy
$KUT$	-	komplexní ukazatel hlubokotažnosti
$l$	mm	konečná délka elementu
$l_0$	mm	počáteční délka elementu
$L$	mm	okamžitá délka
$L_0$	mm	počáteční měřená délka
$m$	kg	hmotnost
$n$	-	koeficient deformačního zpevnění
$R$	MPa	smluvní napětí
$R_{eH}$	MPa	horní mez kluzu
$R_{eL}$	MPa	dolní mez kluzu
$R_{eS}$	MPa	střední mez kluzu
$R_m$	MPa	meze pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
$s$	-	výběrová směrodatná odchylka
$S$	$\text{mm}^2$	okamžitý (skutečný) průřez
$S_0$	$\text{mm}^2$	počáteční plocha příčného průřezu
$t$	s	čas





$UH$	-	ukazatel hlubokotažnosti
$v$	$m.s^{-1}$	rychlost
$x_s$	-	střední aritmetický průměr
$Z$	-	poměrné zúžení (kontrakce)
$ZP$	MPa	zásoba plasticity
$\Delta L$	mm	absolutní prodloužení
$\varepsilon$	-	poměrné prodloužení
$\sigma$	MPa	skutečné napětí
$\sigma_K$	MPa	napětí prvotní meze kluzu
$\varphi$	-	skutečná deformace
$\varphi_0$	-	posunutí



# 1. ÚVOD

Důležitým faktorem při tváření je znalost mechanických vlastností materiálů. Mechanické vlastnosti se běžně získávají ze základních zkoušek, které se provádí za předem daných podmínek. Ze základních normalizovaných zkoušek získáme pouze základní mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu není možné tyto výsledky porovnávat s reálnými situacemi, při kterých jsou materiály vystaveny podmínkám zcela odlišným.

V reálných situacích se podmínky ve většině případů liší od podmínek, při kterých se provádějí běžné zkoušky. Rozdíly mohou nastat v mnoha faktorech, například v odlišném zatěžování, různé teplotě nebo se může projevit vliv vnějšího prostředí. Z tohoto důvodu je zřejmé, že získané mechanické vlastnosti z běžných zkoušek, se nebudou shodovat s těmi v reálném prostředí. Proto je snaha získávat informace o mechanických vlastnostech materiálů při podmínkách, které se blíží realitě. Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením mechanických vlastností materiálů při vyšších rychlostech deformace.

Zatěžování vysokými rychlostmi se oproti statické zkoušce tahem liší charakterem, a půjde tedy o rázové zatížení. Jedním z příkladů, kde se může vyskytnout rázové zatížení, je náraz automobilu do překážky. Především v automobilovém průmyslu by se mohly využít poznatky o mechanických vlastnostech materiálů, získané při vyšších rychlostech zatěžování.

Cílem této bakalářské práce bude zhodnocení tvařitelnosti čtyř různých tenkých plechů při vyšších rychlostech deformace. Nejprve se bude zabývat zjištěním základních mechanických vlastností pomocí statické zkoušky tahem. Poté zjištěním mechanických vlastností při vyšších rychlostech deformace. V závěru práce bude hodnocen vliv rychlosti zatěžování na mechanické vlastnosti zkoušených materiálů.

Příprava zkušebních vzorků byla provedena v dílnách Katedry strojírenské technologie, vlastní měření proběhlo jak v dílnách, tak v prostorech laboratoří Katedry strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci.



## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1. TVAŘITELNOST KOVŮ A SLITIN

Tvařitelnost kovů a slitin je schopnost trvale měnit tvar bez porušení tvářeného tělesa v daných technologických podmínkách. Podle těchto podmínek je možno zhotovit součást s požadovanými rozměry a vlastnostmi, a je tedy ovlivněna deformačním odporem (viz kapitola 2.2.2.). Jednou z potřebných vlastností tvářeného materiálu je plasticita, která je definována velikostí plastického přetvoření do porušení tělesa v daných termomechanických podmínkách (teploty, napjatosti a rychlosti plastické deformace – rychlosti přetvoření). Podrobněji se tímto tématem zabývá publikace [1].

#### 2.1.1. Základní typy a podstata deformací [1, 2]

Podstatou tváření je měnit působením vnějších sil tvar tělesa, tak abychom dosáhli požadovaného tvaru. Požadavkem je, aby tvar tělesa zůstal změněn trvale i po odstranění vnějších sil a aby zůstala zachována spojitost materiálu bez vzniku trhlin. Změna tvaru způsobená vnějšími nebo vnitřními silami, při níž zůstává zachována spojitost materiálu, nazýváme deformací. Každé trvalé deformaci předchází vždy deformace elastická (pružná). Nastalo-li v průběhu deformace porušení spojitosti materiálu vznikem trhlin nebo rozpadem tělesa na několik částí, jedná se o porušení.

Deformace můžeme rozdělit z mechanického hlediska na:

- 1. deformace elastické (vratné),
- 2. deformace plastické (trvalé, tvárné, nevratné).

##### 2.1.1.1. Deformace elastická

U krystalických látek jsou atomy v prostoru pravidelně rozmístěny, tvoří krystalovou mřížku. Mezi atomy působí přitažlivé a odpudivé síly v závislosti na jejich vzdálenosti. V nezatíženém stavu jsou přitažlivé a odpudivé síly v rovnováze. Rovnováha meziatomových sil musí být zachována i ve stavu zatíženém. Proto se v zatíženém stavu mění vzdálenosti atomů. Při elastické (pružné) deformaci dochází



k vychýlení atomů mřížky z jejich rovnovážné polohy. Po odstranění vnějších sil se atomy vrátí do původní polohy

### 2.1.1.2. Deformace plastická

Plastická deformace vzniká při působení napětí a při termomechanických podmínkách tak, že nemůže dojít ke křehkému lomu. Jejich hlavním znakem je nevratnost.

Mohou nastat deformace na hranicích i uvnitř zrn. Existují pouze dva mechanismy plastické deformace, při kterých zůstává zachován krystalický charakter. Je to kluz a dvojčatění. Kluz nastane v krystalu, jestliže smykové napětí v rovině a směru nejhustěji obsazených atomů dosáhne kritické hodnoty. Kluz probíhá postupně v kluzové rovině, podobně jako pohyb poruch krystalové mřížky. Dvojčatění lze definovat, jako natočení (sklopení) jedné části mřížky vůči druhé kolem roviny symetrie.

Plastická deformace je podmíněna hustotou a rozložením poruch krystalové mřížky. Poruchy vznikají už při krystalizaci, v průběhu plastické deformace se jejich počet zvětšuje. Tyto poruchy dělíme na:

- bodové (vakantní místa, intersticiální atomy),
- čárové (dislokace),
- plošné (vrstvené chyby).

### 2.1.2. Stroje pro měření tvařitelnosti

Plastometr je zkušební zařízení pro měření mechanických vlastností materiálů. Hodnotí se zejména síla a deformace. Podle konstrukce se plastometry dělí na [14]:

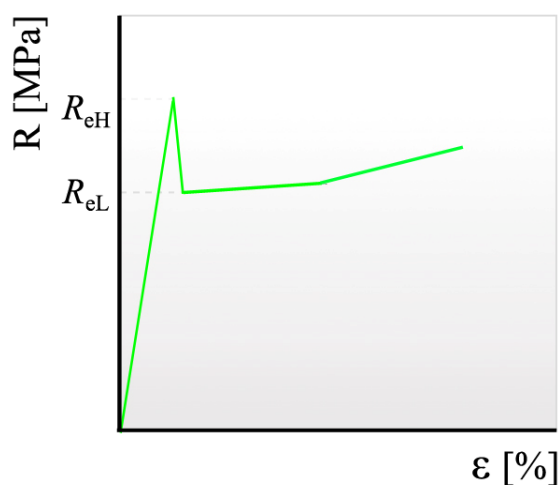
- **univerzální** - stroje pro zkoušky tahem, tlakem, popřípadě ohybem,
- **vačkové** - k určování přetvárných odporů při stlačování, popřípadě tažení,
- **torzní** - pro zjišťování tvařitelnosti při kroucení,
- **úderové (padostroje, buchary)** - pro zjišťování přetvárných odporů a tvařitelnosti při vyšších rychlostech tváření,
- **kyvadlové** - k určení přetvárného odporu z přetvárné práce,
- **stroje pro zkoušení hlubokotažnosti** - ( např. Erichsenova zkouška hlubokotažnosti ).

## 2.2. TVÁŘENÍ VYSOKÝMI PARAMETRY

Je to tváření vysokými rychlostmi, energiemi a výkony [3]. Rychlosti při tváření běžně dosahují  $100 - 150 \text{ m.s}^{-1}$ , ale i mnohem vyšší. Při takto vysokých rychlostech tváření se berou v úvahu setrvačné síly (viz kapitola 2.2.3.). S rostoucí rychlostí tváření klesá vnější tření v materiálu. Při tomto tváření je vysoká kinetická energie dodávaná tvářenému materiálu nebo nástroji.

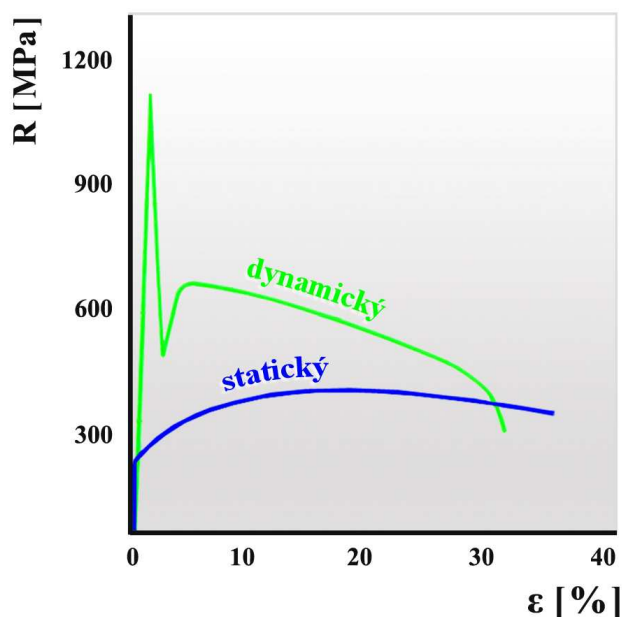
### 2.2.1. Průběh pracovního diagramu za vyšších rychlostí deformace

Už při běžných tahových zkouškách se může pozorovat [2], že při vyšší rychlosti zatěžování se u některých materiálů projevuje zvětšení meze kluzu a pak náhlý pokles tzv. „hrot“ (viz obr. 2.2.1.1.). Jestliže dosáhne napětí horní meze kluzu  $R_{eH}$ , tak náhle klesne na hodnotu dolní meze kluzu  $R_{eL}$ , v tomto okamžiku začínají plastické deformace, je zřejmé z obr. 2.2.1.1.



Obr. 2.2.1.1. Schématické zobrazení „hrotu“.

U zkoušek prováděných rázovým zatěžováním se rozdíl obou mezí kluzu zvyšuje, jak je zobrazeno viz obr. 2.2.1.2. Tento jev souvisí s nestabilitou deformačního procesu [2]. Proto se může horní mez kluzu uvádět jako nestabilní, a dolní mez kluzu jako stabilní. Vzniklý „hrot“ představuje proces rozvoje plastických deformací a je dán počtem volných a blokových dislokací v materiálu.



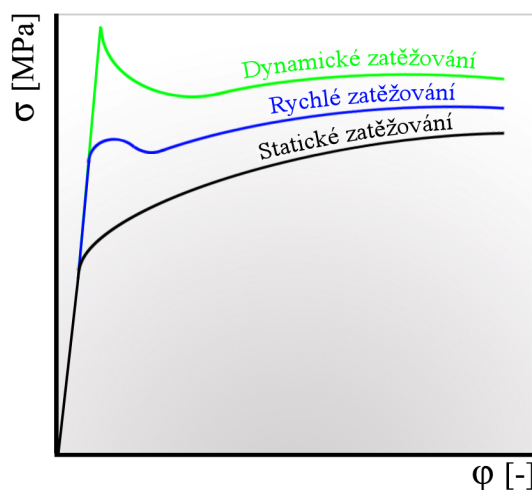
Obr. 2.2.1.2. Pracovní diagram pro statické a dynamické zatěžování.

V oblasti pružného zatěžování, tj. až do napětí rovného stabilní mezi kluzu, je v materiálu jistý počet dislokací, jejichž pohybem je způsobena plastická deformace [2]. Velikost působícího napětí závisí na rychlosti pohybu dislokací. Část dislokací obsažených v krystalu může být blokována (např. nečistotami), zbytek jsou dislokace pohyblivé. Počet dislokací během deformace narůstá. Podle charakteru vzrůstu počtu pohyblivých dislokací a jejich závislosti na rychlosti působícího napětí se ovlivňuje tvar počáteční fáze pracovního diagramu.

## 2.2.2. Deformační odpor při vysokých rychlostech deformace [4, 9]

Definicí deformačního odporu je napětí, které je nutné pro vznik plastické deformace při určitých technologických podmínkách. Na deformační odpor mají vliv deformační rychlost, teplota a stav napjatosti. Každý materiál má svoji tzv. kritickou rychlost deformace, která závisí na podmínkách, jako jsou rychlost vnějších sil a doba zatěžování. Pokud materiál této hodnoty nedosáhne, je vliv rychlosti deformace na deformační odpor zanedbatelný. Po překročení této kritické hodnoty, dojde k značnému ovlivnění deformačního odporu (změna teploty během deformace). Obecně platí, že velikost deformačního odporu roste, pokud roste i deformační rychlost.

Deformační odpor materiálu je reprezentován hodnotami meze pevnosti a meze kluzu. Je známo, že při tváření za studena s rostoucí deformační rychlostí se zvyšují hodnoty meze pevnosti a kluzu. Při vyšších rychlostech deformace roste mez pevnosti pomaleji oproti mezi kluzu. V některých případech může nastat okamžik, kdy mez kluzu přeroste nad hodnotu meze pevnosti, stává se to při vysokých rychlostech deformace (viz obr. 2.2.2.1.).



Obr. 2.2.2.1. Zobrazení změn meze kluzu a meze pevnosti pro různé rychlosti zatěžování [9].

Navyšování deformačního odporu je pozorováno při dynamickém zatěžování, avšak výrazné zvyšování je zřetelné, až při rychlostech rázu nad  $v = 100 \text{ m.s}^{-1}$ . A právě při těchto velmi vysokých rychlostech deformace je nutné počítat s účinkem setrvačných sil, které budou popsány v následující kapitole.

### 2.2.3. Setrvačné síly při tváření vysokými parametry

Využití setrvačných sil je principem HERF (High Energy Rate Forming) metod (tvářená součást je vržena proti kovadlině nebo zápustce) [3]. Setrvačné síly mohou mít pozitivní účinek hlavně na zatékání materiálu do ostrých rohů zápustky, ale také u prevence tvorby vad u zpětného protlačování. Tyto síly mají také negativní účinek. Mohou se šířit ve formě vlny, ta se může odrazit (v zápustce) a vytrhnout materiál zpět. Z tohoto důvodu je nezbytná analýza jejich vlivu.

Při uvedení do plastického toku vysokou rychlostí vyžaduje materiál vyšší spotřebu energie k vyvolání setrvačných sil. Proto musí být i relativní přetvárný tlak vyšší. Setrvačné síly jsou nezávislé na geometrii nástrojů, součiniteli tření a teplotě.

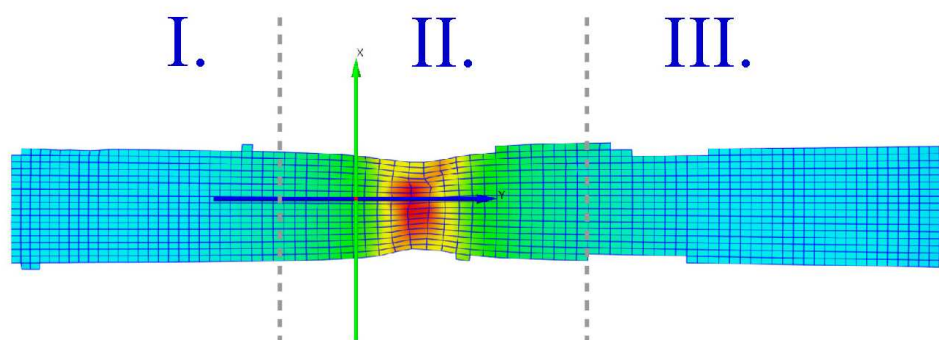
Relativní podíl setrvačných sil je vyšší u materiálů s nižší mezí kluzu, tedy při tváření za tepla.

#### 2.2.4. Fyzikální podstata procesu zpevňování při vysokých rychlostech deformace, pohyb dislokací a procesy brždění [3]

Plastická deformace a její mechanismus souvisí s pohybem a multiplikací (přírůstku hustoty) dislokací. Pohybu dislokací brání vnitřní nebo vnější překážky pohybu a tzv. procesy brždění (drag processes). Brzdné procesy mohou být rozděleny na dva mechanismy:

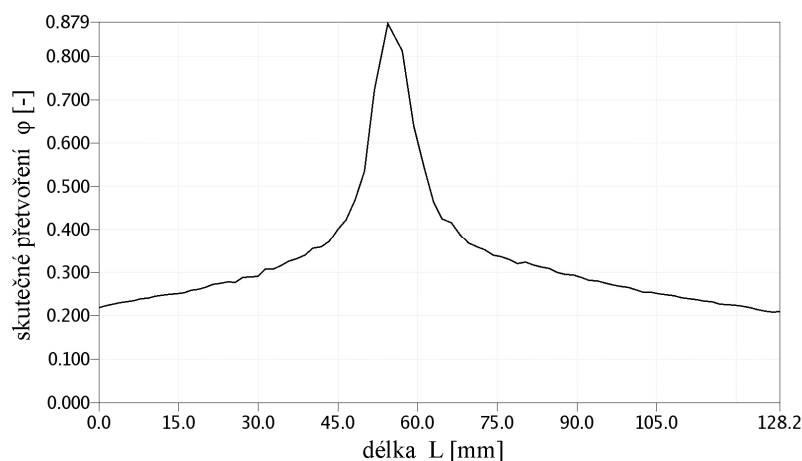
- deformační zpevnění
- elektronové brždění (fonon drag).

**Deformační zpevnění** – tento mechanismus je aktivní při každé rychlosti deformace. Pohyb dislokací se aktivuje napětím. Při vzájemném působení dislokací a překážek se jejich pohyb mřížkou brzdí, důsledkem je deformační zpevňování. V oblasti krčku je deformace  $\varepsilon$  větší spolu s dislokační aktivitou, dochází k deformačnímu zpevnění. Zvyšování aktivity dislokací vytváří další překážky jejich pohybu a to má za následek, zvýšení meze kluzu materiálu. Jestliže je v oblasti krčku  $\sigma_{yII} > \sigma_{yI,III}$ , pak se oblast v krčku plastizuje (viz obr 2.2.4.1.).



Obr. 2.2.4.1. Oblast krčku. Při tahové nehomogenní deformaci se začne vytvářet krček (oblast II). Se zmenšujícím se průřezem krčku se napětí v krčku zvyšuje.





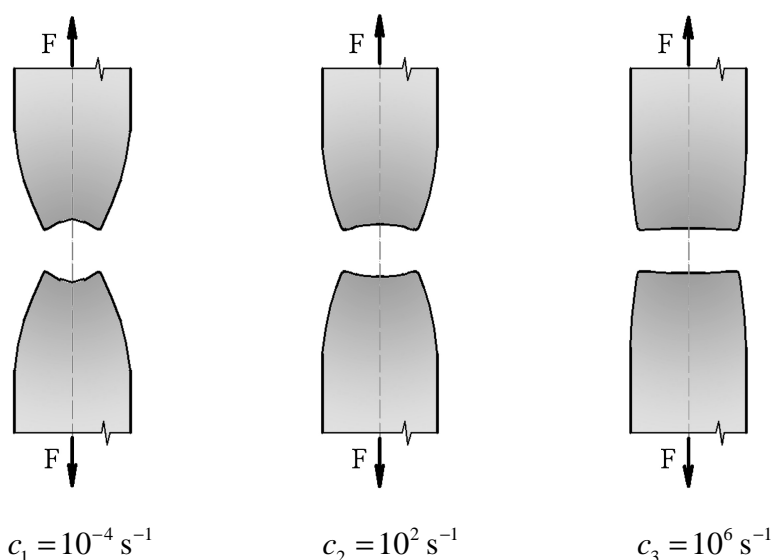
Obr. 2.2.4.2. Skutečné přetvoření v závislosti na délce v oblasti krčku.

**Elektronové brždění (fonon drag)** – tento mechanismus se stává důležitým faktorem zpevnění a to hlavně při vysokých rychlostech deformace. V oblasti krčku je rychlost toku materiálu a rychlost deformace vyšší než vně krčku.

Při vyšších rychlostech deformace je pohyb dislokací bržděn dalším mechanismem „fonon drag“. Fonon můžeme popsat jako kvantum vibrační energie v pevné látce, pohybuje se rychlostí zvuku, protože zvukové vlny jsou v podstatě elastické vlny. Fonony jsou projevem vlnění (částic) tepelné energie v pevných látkách.

Napětí snižuje aktivační energii vyžadovanou k pohybu dislokací, ale současně existuje určitý kritický časový okamžik, kdy je pravděpodobnost pohybu nejvyšší. Při nízkých rychlostech deformace se dislokace pohybují tzv. hladce. Při vysokých rychlostech deformace se dislokace pohybují přetržitě.

Důsledkem vlivu elektronového brždění je potlačení ztráty stability v krčku a docílení vyššího prodloužení než působením samotného mechanismu deformačního zpevnění. Tento jev lze prakticky využít při hlubokém tažení vysokými rychlostmi (např. při hydromechanickém tažení).



Obr. 2.2.4.3. Schématické zobrazení krčku a typ lomu při dynamické tahové zkoušce zvyšující se deformační rychlostí [3].

## 2.3. MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOVŮ

Důležitým faktorem při návrhu výrobků je znalost mechanických vlastností materiálů a jejich použitelnost pro danou aplikaci. Vlastnosti materiálů se zjišťují pomocí mechanických zkoušek. Mezi základní mechanické zkoušky patří zkouška tahem, tlakem, krutem a ohybem. Můžeme je rozdělit podle charakteru působení síly na [2]:

- *Statické zkoušky* – Zatěžující síla se zvyšuje postupně. Zkouška probíhá za nižších rychlostí.
- *Dynamické zkoušky rázové a cyklické* – Zatěžující síla působí rázem, tyto zkoušky probíhají za vyšších rychlostí než u zkoušek statických. Při cyklických zkouškách se napětí mění plynule, při těchto zkouškách se určuje mez únavy materiálu.

### 2.3.1. Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem je předepsána normou ČSN – EN 10002-1 [5] a je to nejpoužívanější zkouška pro hodnocení mechanických vlastností materiálů.

Ze statické zkoušky tahem lze získat mnoho hodnot, a mezi ty základní patří:

- mez pevnosti  $R_m$
- mez kluzu  $R_{p0,2}$
- kontrakce  $Z$
- tažnost  $A_x$



Pro hodnocení tvařitelnosti materiálů se dále používají různé odvozené veličiny. Protože výše uvedené hodnoty samy o sobě z hlediska tvařitelnosti materiálů nemají velkou vypovídající hodnotu. Odvozené veličiny, které popisují tvařitelnost jsou:

$$\text{Komplexní ukazatel tvařitelnosti: } KUT = A_x \cdot \frac{R_{p0,2}}{R_m} \quad [-]. \quad (1)$$

$$\text{Ukazatel hlubokotažnosti: } UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \quad [-]. \quad (2)$$

$$\text{Zásoba plasticity: } ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot A_x \quad [\text{MPa}], \quad (3)$$

kde  $k$  [-] je koeficient zaplnění plochy.

Jedním z dalších způsobů určení tvařitelnosti plechů je exponent deformačního zpevnění  $n$ . Tento exponent vyjadřuje maximální rovnoměrné přetvoření. Exponent se dá získat aproximací skutečného diagramu tahové zkoušky, podle následující rovnice:

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad [\text{MPa}], \quad (4)$$

kde  $C$  je modul monotónního zpevnění.

Na základě konstant  $C$  a  $n$  se provádí numerické simulování plošného tváření.

#### • Popis a vyhodnocení zkoušky [1, 2]:

Tahová zkouška se provádí na normalizovaných zkušebních tyčích. V průběhu zkoušky dochází vlivem tahového namáhání k prodlužování zkušební tyče až do jejího přetržení. Na zkušební tyč působí plynule vzrůstající síla.

Výstupem z měření zkoušky je průběh zátěžné síly  $F$  v závislosti na prodloužení  $\Delta L$ . Pomocí přepočtu naměřených hodnot je možné vypracovat smluvní (pracovní) charakteristiky  $R - \varepsilon$  vztažené na původní rozměr zkušební tyče, kde normálové napětí je dáno vztahem:

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}], \quad (5)$$

kde  $F$  [N] je působící síla a  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční plocha příčného průřezu vzorku. Poměrnou deformaci lze vypočítat podle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [-], \quad (6)$$

kde  $L_0$  [mm] je původní délka vzorku prodloužená na délku  $L$  [mm].

Pro skutečné napětí platí charakteristika  $\sigma - \varphi$  a je dána vztahem:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]}, \quad (7)$$

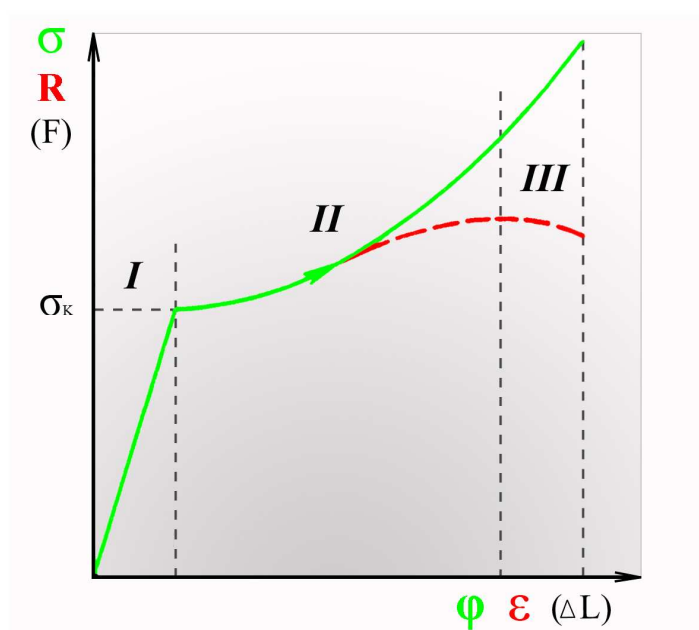
kde  $S$  [mm<sup>2</sup>] je skutečný (okamžitý) plošný průřez vzorku.

Skutečná poměrná deformace je dána součtem malých deformací  $d\varphi = \frac{dL}{L}$ , pak platí:

$$\varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad [-], \quad (8)$$

kde  $L$  [mm] je okamžitá měřená délka vzorku.

Jak je vidět na obr. 2.3.1.1. průběh závislosti  $R - \varepsilon$  smluvního diagramu (červeně) a průběh závislosti  $\sigma - \varphi$  skutečného diagramu (zeleně) jsou rozdílné.



Obr. 2.3.1.1. Schématické porovnání skutečného (zeleně) a smluvního (červeně) diagramu, dále pak oblasti pracovního diagramu: I – oblast pružných deformací, II – oblast rovnoměrných plastických deformací, III – oblast nerovnoměrných plastických deformací.

Diagram  $F - \Delta L$  (viz obr. 2.3.1.1.) získaný na trhačím stroji, může být v případě pružně plastických deformací rozdělen na tři oblasti. První oblast I pružných deformací. U ocelí a některých dalších kovů, je tato oblast téměř lineární



a proto platí Hookeův zákon:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad [-], \quad (9)$$

kde  $\sigma$  [Mpa] je skutečné napětí a  $E$  [Mpa] je modul pružnosti v tahu.

V oblasti *I* (viz obr. 2.3.1.1.) pružné deformace končí, když napětí  $\sigma$  dosáhne prvotní meze kluzu  $\sigma_K$ .

V oblasti *II* (viz obr. 2.3.1.1.) vznikají plastické deformace rovnoměrně rozložené po celé délce zkušební tyče. Při určování napětí i deformací, se musí uvažovat se změnou rozměrů zkušební tyče v průběhu deformace. Vzhledem k tomu, že deformace je v celém vzorku rozložena rovnoměrně, je pak rychlost deformace

$c = \frac{d\varepsilon}{dt}$ , v celém vzorku stejná a má hodnotu:

$$c = \frac{d\left(\ln \frac{l}{l_0}\right)}{dt} = \frac{d\left(\ln \frac{l}{l_0}\right)}{dl} \cdot \frac{dl}{dt} = \frac{v}{l} \quad [s^{-1}], \quad (10)$$

kde  $v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] je relativní rychlost upínacích hlav.

Rychlost deformace je značně proměnná a kromě toho závislá na vlastnostech zkoušeného materiálu. Nemůže být proto u neznámého materiálu předem stanovena na požadovanou hodnotu. Rychlost  $v$  je určena vztahem:

$$v = c \cdot l = \frac{l_0}{S_0} \cdot \frac{dF}{dt} \cdot \frac{e^{2\varepsilon}}{\frac{d\sigma}{d\varepsilon} - \sigma} \quad [m \cdot s^{-1}]. \quad (11)$$

Oblast *III* (viz obr. 2.3.1.1.) začíná v místě, kde naroste síla  $F$  do maxima tj. při smluvní mezi pevnosti. Až po tuto hodnotu jsou deformace stabilní. To znamená, že na průběh deformace nemají vliv malé odchylky mechanických vlastností, napjatosti, rozměrů a teploty od středních hodnot. Při dosažení smluvní meze pevnosti se nehomogenity i nepřesnosti projeví tak, že deformace se stává nestabilní. Deformace již nejsou rozloženy rovnoměrně v celé tyči, ale soustřeďují se jen v určité části tyče, která se v průběhu deformace zmenšuje, až nastane porušení tvárným lomem. Tato oblast je oblastí tvoření tzv. krčku. Nerovnoměrné rozložení deformací způsobuje i nerovnoměrné rozložení napětí. K určení pracovního diagramu v této oblasti je proto třeba určit intenzity napětí, deformací a rychlosti deformací.



### 2.3.2. Zkouška tlakem [2]

Další zkouškou pro zkoušení mechanických vlastností je zkouška tlakem. Při tlakové zkoušce působí síla v ose zkušební tělesa. Jestliže má být dosaženo homogenní jednoosé napjatosti, musí být voleny krátké vzorky ( $h < 1,5d$ ). Protože při tlakovém namáhání delších tyčí se projevuje nestabilita, při níž nastává vybočení tyče.

Ve stykových plochách zkušební vzorku s nástrojem působí tření, a proto na čelní ploše působí smykové napětí. Účinek smykového napětí se projeví na čelních plochách, ale i v celém vzorku. Projevuje se soudečkový tvar vzorků. V objemu vzorku vznikají značné rozdíly v tvrdosti, což znamená nerovnoměrnost rozložení napětí a deformací. A to znemožňuje použití běžné tlakové zkoušky pro určení skutečného pracovního diagramu.

Možnost použití tlakové zkoušky je proto podmíněna odstraněním tření ve stykové ploše s nástrojem. Existuje několik metod, pomocí kterých se rovnoměrně rozloží tlak do celé plochy. To má za následek, že prakticky v celém objemu vzorku je homogenní jednoosá tlaková napjatost. Pro určení práce a rychlosti deformace platí vztahy stejné jako při prostém tahu, ovšem se změněnými znaménky u deformace a přetvárného odporu.

### 2.3.3. Zkouška krutem

Při zkoušce krutem vznikají v průřezu tyče smyková napětí [6]. Osa tyče je neutrální, a proto na ní je smykové napětí nulové. Největší smykové napětí se dosáhne v okrajových vláknech zkušební tyče kruhového průřezu. Mechanické vlastnosti se vyhodnocují podle velikosti krouťícího momentu a smykových napětí.

Výhodou této zkoušky je, že dává spolehlivé závěry o plastických vlastnostech materiálu při různých podmínkách tváření.

### 2.3.4. Zkouška ohybem

Zkouškou ohybem se hodnotí lépe křehké materiály oproti materiálům houževnatým [6]. Houževnaté materiály se deformují, aniž by bylo možné stanovit výslednou pevnost, protože nedojde k lomu. Pro křehké materiály lze určit deformační schopnost z průhybu.



### 2.3.5. Zkouška vrubové houževnatosti

Zkouška vrubové houževnatosti patří mezi zkoušky dynamické rázové [6]. Je jednoduchá a rychlá. Principem zkoušky je určení energie spotřebované k přeražení zkoušené tyčky opatřené vrubem. Podmínky k provedení a vyhodnocení zkoušky jsou uvedeny v ČSN EN 10045-1. Doporučená rychlost kladiva je  $4 - 7 \text{ m.s}^{-1}$  a je závislá na zdvihu kyvadla. Zkouška se provádí pomocí Charpyho kladiva.

### 2.3.6. Zkouška pěchovací [2]

Dynamické pěchování je jedním ze základních tvářecích procesů, hlavně při dynamickém zatěžování. Je to nejběžnější operace na strojích pracujících rázy (např. buchary). Při tváření vysokými rychlostmi a energiemi se již projevuje vliv setrvačných sil pěchovaného materiálu. Tento proces není již možno považovat za izotermický.

Vedle praktického významu má pěchování základní význam pro zjišťování mechanických vlastností materiálu při rázovém zatěžování. Předností dynamické tlakové zkoušky je neprojevující se nestabilita toku materiálu při velkých plastických deformacích. Ty jsou právě typické pro zkoušku tahovou jak statickou, tak zvláště dynamickou. Při větších rychlostech rázu může vzniknout i několik krčků. Tvoření krčků znemožňuje dostatečně přesné určení dynamického pracovního diagramu při velkých plastických deformacích.

Pěchovací zkouška k určení pracovního diagramu probíhá při rychlostech deformace  $10^{-3}$  až  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Při zvyšování rychlosti deformace na vyšší hodnoty se nejdříve projeví vliv rychlosti deformace a neizotermičnosti děje. Teprve při dostatečně velké rychlosti pěchování se projeví vliv setrvačnosti pěchovaného materiálu – vnitřní setrvačnost.

### 2.3.7. Zkoušky bariérové

Bariérové zkoušky (crash testy) [7], při kterých je testována odolnost karosérie automobilu proti různým druhům nárazu a funkčnost bezpečnostních systémů při čelním, bočním, zadním nárazu, nebo při převrácení vozu. Zkoušky se uskutečňují při různých rychlostech nárazu ( $10 - 75 \text{ km/h}$ ), do různě deformovatelné či pevné překážky. Takto získané poznatky jsou velmi cenné a lze je uplatnit



v simulačních softwarech. V Evropě se těmito zkouškami zabývá nezávislé konsorcium Euro-NCAP, které uděluje hodnocení bezpečnosti vozidel.

## **2.4. PLECHY POUŽÍVANÉ PŘI KONSTRUKCI KAROSÉRIÍ**

V automobilovém průmyslu jsou stále vyšší požadavky na snižování spotřeby pohonných hmot [8]. Z tohoto důvodu je snaha snižovat hmotnost karoserie. Oproti tomu se ale klade velký důraz na zvýšení bezpečnosti pasažérů. Z toho vyplývá, že je potřeba používat materiály, které mají vysoké mechanické vlastnosti, ale i dostatečně vysokou tažnost vzhledem k tvarově složitým dílům. Tyto vlastnosti jsou ale protichůdné, proto je vývoj plechů orientován tak, aby splnil výhodný poměr mezi pevností a tažností.

Na obr. 2.4.1. je uveden přehled ocelí používaných v automobilovém průmyslu. Dále bude uveden jen stručný popis ocelí používaných při stavbě karoserie, podrobněji popsáno např. v [9].

### **2.4.1. Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem [9, 10]**

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem mají výbornou tvařitelnost a proto se používají na tvarově složité výlisky. Používají se taky na pohledové díly, na které jsou kladeny vysoké nároky.

V závislosti na chemickém složení, mechanických vlastnostech a způsobu výroby se rozdělují do skupin:

- plechy běžné kvality CQ (Commercial Quality),
- tažné DQ (Drawing Quality),
- hlubokotažné DDQ (Deep Drawing Quality),
- zvlášť hlubokotažné EDDQ (Extra Deep Drawing Quality),
- super hlubokotažné EDDQ - S (Extra Deep Drawing Quality – Super).





## 2.4.2. Pevnostní oceli [9, 10]

### 2.4.2.1. *Plechý z IF ocelí bez intersticií*

IF oceli obsahují velmi malé množství rozpuštěného dusíku a uhlíku. Kvůli sníženému obsahu těchto prvků mají IF oceli výbornou tvažitelnost, ale nižší pevnost. Jsou odolné proti stárnutí a to i po žárovém zinkování.

### 2.4.2.2. *Plechý z IF ocelí vykazující BH efekt*

Kvůli nízké mezi kluzu u klasických IF ocelí byly vyvinuty IF oceli s BH efektem. Podstatou BH efektu je zvýšení meze kluzu při teplotě vypalování laku karoserie (při 170°C). Výhodou je, že mez kluzu je při lisování nízká a po vypálení laku se navýší (o 30 až 80 MPa), tímto se zajistí dostatečná tuhost povrchových dílů.

## 2.4.3. Vysokopevnostní oceli [9, 10]

### 2.4.3.1. *Plechý z DP ocelí*

Oceli DP, neboli dvoufázové, jsou nízkouhlíkové tvořené měkkou feritickou maticí, ve které se nachází menší podíl tvrdé martenzitické fáze. Tato struktura zaručuje vysokou pevnost a velmi dobrou tvažitelnost. Používají se na výrobu disků kol.

### 2.4.3.2. *Plechý z TRIP ocelí*

Oceli TRIP jsou tvořeny feritem, bainitem a menším množstvím zbytkového nepřeměněného austenitu. Oceli se vyznačují vysokou kapacitou deformačního zpevnění.

### 2.4.3.3. *Plechý z TWIP ocelí*

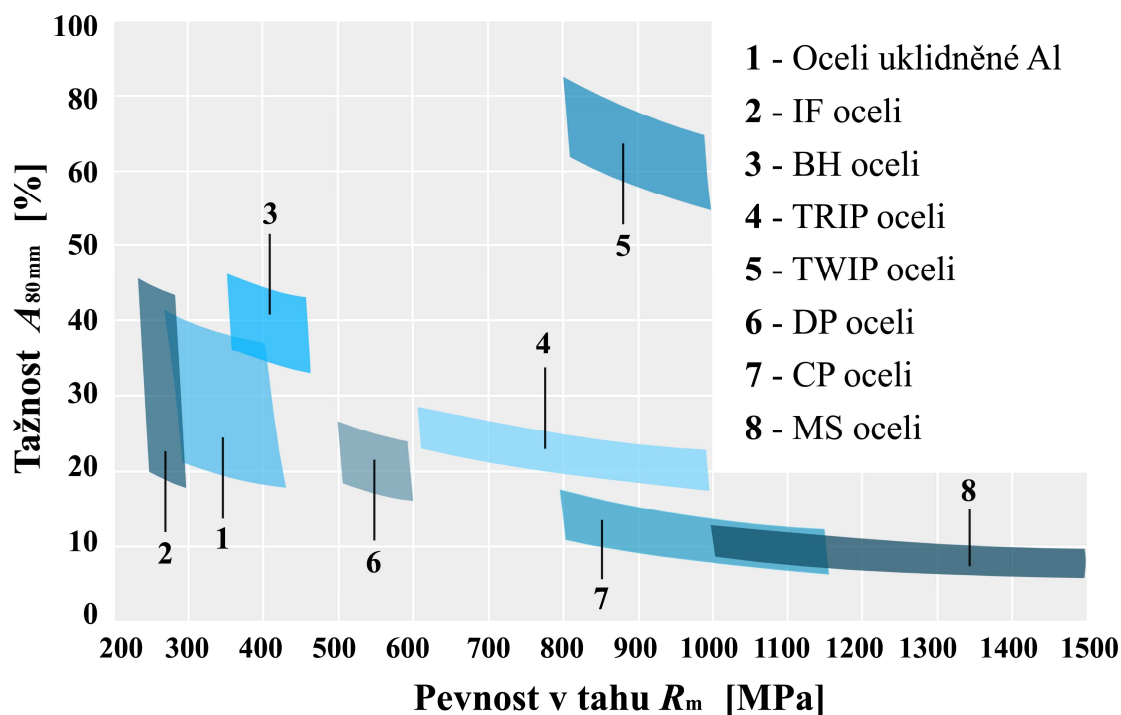
Oceli TWIP mají austenitickou matici s obsahem 15 až 30 % Mn dolegované Al a Si. Díky tomu dosahují extrémní hodnoty tažnosti (řádově až 100 %). Tyto oceli se vyznačují také vysokou pevností.

#### 2.4.3.4. Plechy z CP ocelí

Oceli CP jsou vícefázové s jemnozrnnou strukturou. Ta je tvořena feritickou maticí a strukturními složkami bainitem, martenzitem a austenitem. U těchto ocelí se využívá především strukturního zpevnění.

#### 2.4.3.5. Plechy z MS ocelí

Martenzitické oceli mají strukturu tvořenou hlavně martenzitem s minimálním množstvím feritu. Tyto oceli se vyznačují velmi vysokými mechanickými vlastnostmi.



Obr. 2.4.1. Přehled ocelí podle závislosti tažnosti na pevnosti v tahu, vypracováno podle mechanických vlastností materiálů uvedených v [9].



### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bude zhodnocení tvařitelnosti tenkých plechů při vyšších rychlostech deformace a určení vlivu rychlosti zatěžování na základní mechanické vlastnosti materiálů.

Nejprve se bude zabývat zjištěním mechanických vlastností pomocí statické zkoušky tahem (rychlost  $v_0$ ). Poté zjištěním mechanických vlastností pomocí zkoušek provedených za vyšších rychlostí deformace (rychlosti  $v_1$  a  $v_2$ ). V závěru budou výsledky z obou zkoušek vzájemně porovnány.

Vybrány byly čtyři materiály, první z materiálů byl materiál na bázi Al, další tři patří do skupiny ocelových hlubokotažných plechů, které se používají při stavbě karoserie v automobilovém průmyslu. Dále budou uvedeny stručné charakteristiky zkoušených materiálů.

Charakteristika materiálu č. 1 **Al 6060** (dle EN 573-3) [11], pevnost materiálu je  $R_m = 220$  MPa. Jeho vlastnosti jsou dobrá korozevzdornost a svařitelnost, může se použít pro tváření za tepla i za studena.

Charakteristika materiálu č. 2 **DX54 DZ100** (dle EN 10 142) výrobcem je ThyssenKrupp Steel AG [12]. Mechanické vlastnosti materiálu jsou  $R_m = 260 - 350$  MPa,  $R_{p0,2} = 120 - 220$  MPa a  $A_{80\text{ mm}} = \text{min. } 36\%$ . Používá se hlavně pro tváření za studena.

Charakteristika materiálu č. 3 **DC05B SBV – 15** (dle EN 10 130) výrobcem je ThyssenKrupp Steel AG [12]. Mechanické vlastnosti materiálu jsou  $R_m = 270 - 330$  MPa,  $R_{p0,2} = 140 - 180$  MPa a  $A_{80\text{ mm}} = \text{min. } 40\%$ .

Charakteristika materiálu č. 4 **H180 BD+Z** (dle EN 10 143) [13]. Mechanické vlastnosti materiálu jsou  $R_m = 300 - 360$  MPa,  $R_{p0,2} = 180 - 240$  MPa a  $A_{80\text{ mm}} = \text{min. } 34\%$ .



### 3.1. URČENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ZKOUŠENÉHO MATERIÁLU

#### 3.1.1. Statická zkouška tahem

K zjištění základních mechanických vlastností zkoušeného materiálu byla provedena statická zkouška tahem dle normy ČSN – EN 10002-1 [5]. Získané mechanické vlastnosti materiálů jsou uvedeny v tab. 3.1.1.1.

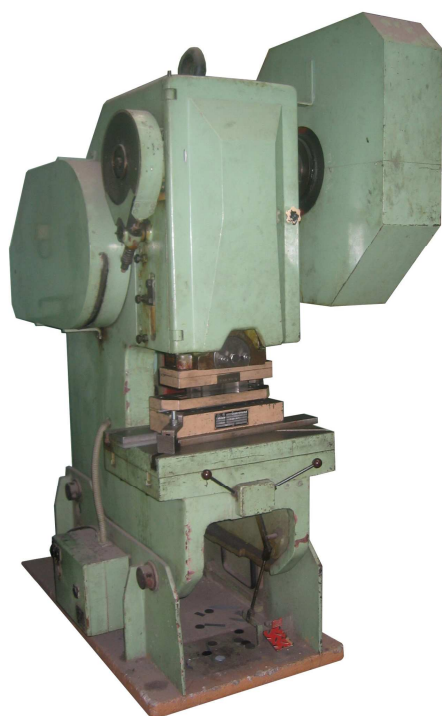
K provedení samotné zkoušky, bylo třeba vyhotovit od každého materiálu osm zkušebních tyčí (viz obr. 3.1.1.3.). Samotné plechy se nejprve nastříhaly na tabulových padacích nůžkách (viz obr. 3.2.1.1.), a to ve směru 0° (směr válcování plechu). Poté byly vystřiženy do konečné podoby na výstředníkovém lisu (viz obr. 3.1.1.1.). Rozměry zkušební tyče jsou zobrazeny na obr. 3.1.1.4.

Zkouška byla provedena na statickém trhacím zařízení TIRAtest 2300 (maximální zatížení do 100 kN) v laboratoři zkoušení kovů (viz obr. 3.1.1.2.). Součástí celého zařízení je externí mechanický průtahoměr MFN-A, pomocí kterého se určila tažnost  $A_{80\text{ mm}}$ . Ze zkoušky byla vyhodnocena mez pevnosti  $R_m$ , mez kluzu  $R_{p0,2}$  a tažnost  $A_{80\text{ mm}}$ . Naměřená data byla následně zpracovávána pomocí softwaru LabNet v. 4.2017.

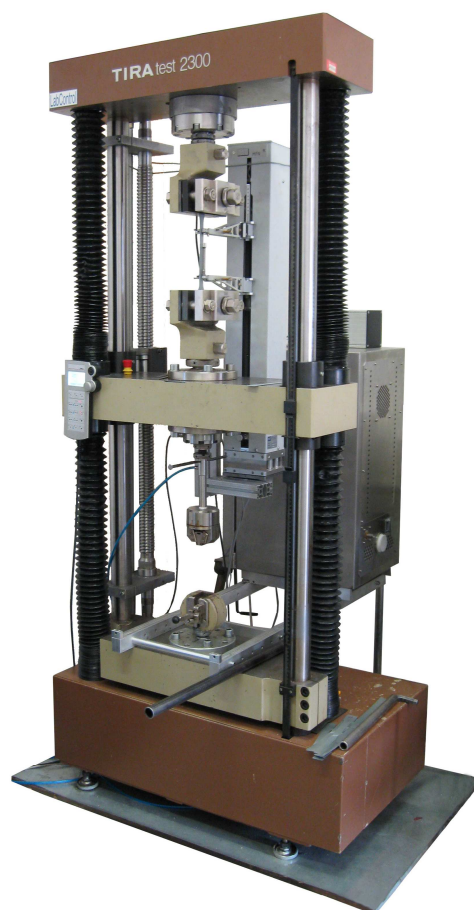
Zatížení zkušebních vzorků se provádělo posuvem příčnicku rychlostí  $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , který odpovídá rychlosti  $v_0 = 0,00017\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

*Tab. 3.1.1.1. Mechanické vlastnosti materiálů spolu se směrodatnými odchylkami, získané pomocí statické zkoušky tahem.*

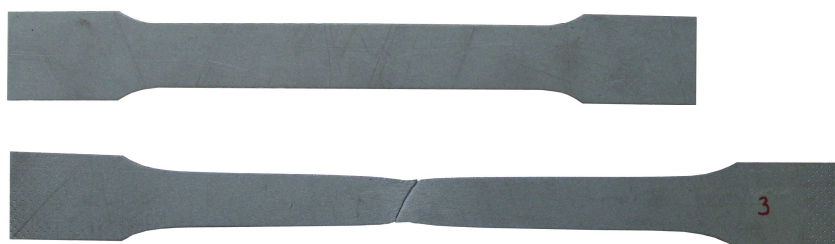
Materiál	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]
Al 6060	29,0 0,6	141,1 0,5	256,9 0,9
DX54 DZ100	30,9 0,2	169,5 4,0	275,0 3,2
DC05B SBV – 15	45,2 0,3	160,0 2,1	280,1 2,0
H180 BD+Z	36,0 1,0	213,4 2,5	318,1 2,4



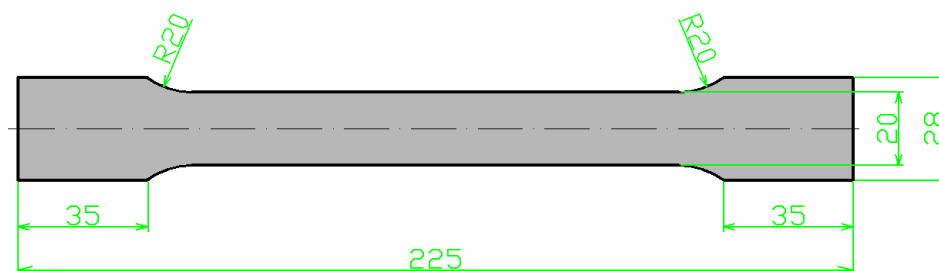
*Obr. 3.1.1.1. Výstředníkový lis, který se nachází v dílnách Katedry strojírenské technologie.*



*Obr. 3.1.1.2. Zkušební statické trhací zařízení TIRAtest 2300.*



*Obr. 3.1.1.3. Zkušební tyč před a po provedení zkoušky.*



*Obr. 3.1.1.4. Výkres zkušební tyče nakreslený v programu AutoCAD 2005.*

## 3.2. MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PŘI VYŠŠÍCH RYCHLOSTECH DEFORMACE

### 3.2.1. Příprava měření

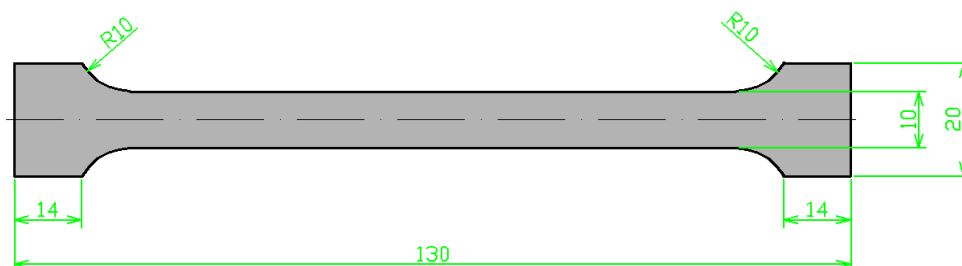
Příprava vzorků probíhala v dílnách Katedry strojírenské technologie. Vzorky v podobě plechů čtyř daných materiálů, byly nastříhány na padacích nůžkách (viz obr. 3.2.1.1.) ve směru  $0^\circ$  (směr válcování plechu), a následně frézovány na požadovaný tvar. Konečné rozměry zkušebního vzorku jsou zobrazeny na obr. 3.2.1.3. Zkušební vzorek před a po přetržení je zobrazen na obr. 3.2.1.2.



Obr. 3.2.1.1. Tabulové padací nůžky.



Obr. 3.2.1.2. Zkušební tyč před a po přetržení.



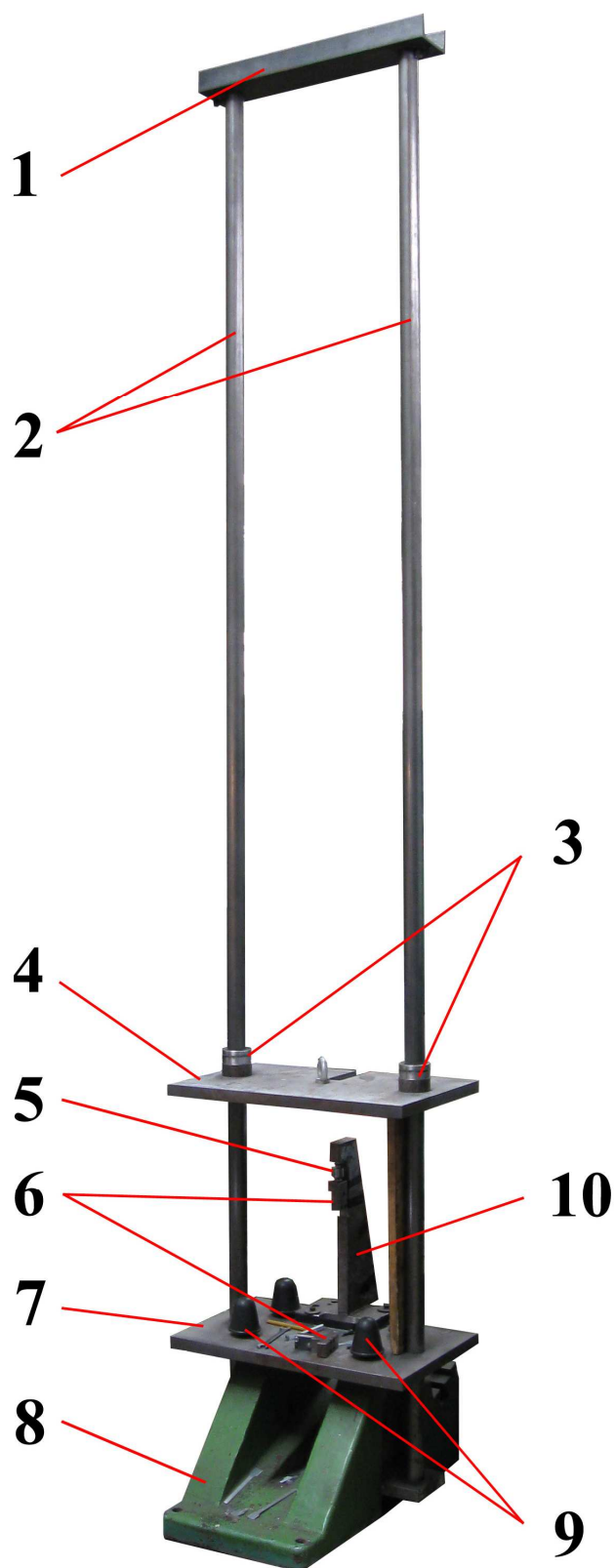
Obr. 3.2.1.3. Výkres zkušební tyče nakreslený v programu AutoCAD 2005.

### 3.2.2. Popis měřicího zařízení

Měřicí zařízení umožňuje měření mechanických vlastností při jednoosém tahovém stavu napjatosti plechu za vyšších rychlostí deformace (viz obr. 3.2.2.1.). Maximální možná dopadová výška činí 2,4 m. Podle vztahu (13) bude tedy maximální dopadová rychlost úderové desky  $v = 6,2 \text{ m.s}^{-1}$ . Konstrukce a podrobnější popis celého zařízení je uvedeno v [14].

#### *Popis zařízení:*

- 1 – příčník
- 2 – vodící tyče
- 3 – kuličková pouzdra
- 4 – úderová deska
- 5 – silový snímač
- 6 – upínací přípravek
- 7 – základová deska
- 8 – základový dílec
- 9 – pryžové nárazníky
- 10 – stojan



Obr. 3.2.2.1. Zkušební zařízení.



### • Měření síly

Měření síly bylo provedeno pomocí měřicího zařízení SH – 1 dodané firmou LabControl. Toto zařízení je určeno pro měření síly při dopadu rázového kladiva, které zaznamenává průběh síly v čase. K tomuto zařízení byl použit software pro PC – LabControl 1.0.0.0. Dále pak silový snímač U9B – 5kN, který je znázorněn viz obr. 3.2.2.2. Jeho rozsah je od 2 N do 5000 N. Lze s ním měřit tahové i tlakové zatížení.



Obr. 3.2.2.2. Tenzometrický silový snímač.

### 3.2.3. Průběh měření

V první řadě byla stanovena dopadová rychlost činné desky. Ta vychází z teoretického vztahu pro výpočet volného pádu:

$$v = \sqrt{2gh} \quad [\text{m.s}^{-1}], \quad (12)$$

kde  $g$  [ $\text{m.s}^{-1}$ ] je gravitační zrychlení ( $g = 9,81 \text{ m.s}^{-1}$ ) a  $h$  [m] je dopadová výška.

Aby do výpočtu mohly být zohledněny různé faktory, které působí při volném pádu, jako například pasivní odpory vzniklé vedením desky nebo odpor vzduchu padající desky. Bylo nutností upravit výpočtový vztah. Z tohoto důvodu byla výsledná rychlost podle vztahu (12) snížena o 10 %. Ve skutečnosti bude tedy





dopadová rychlost desky menší. V tomto případě bude výsledný vztah vypadat takto:

$$v = 0,9 \cdot \sqrt{2gh} \quad [\text{m.s}^{-1}], \quad (13)$$

podle vztahu (13) byly vypočteny dopadové rychlosti podle výšky uvedené viz tab. 3.2.3.1.

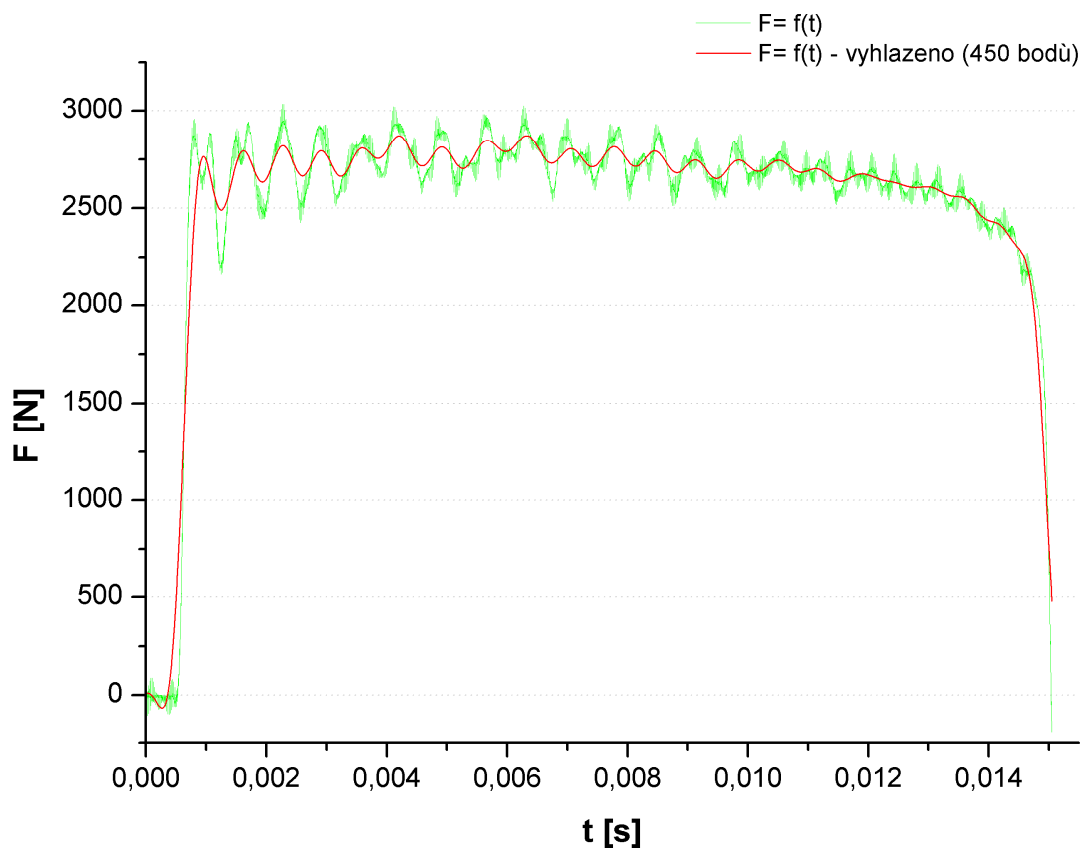
Tab. 3.2.3.1. Dopadové rychlosti vypočítané podle výšky.

Označení	$h$ [ m ]	$v$ [ m.s <sup>-1</sup> ]
$v_0$	-	0,00017
$v_1$	0,4	2,5
$v_2$	0,5	2,8

### • Postup a metoda vyhodnocení naměřených dat

Při měření se vyskytly nežádoucí jevy v podobě kmitání soustavy (způsobeno prudkým dopadem úderové desky) a také pronikání šumové frekvence z napájecího měřicího systému do snímaného signálu. Vlivem těchto jevů bylo ovlivněno naměření průběhu zátěžné síly.

Z výše uvedených důvodů bylo potřeba snímaný signál vyfiltrovat a eliminovat tak kmitání. To se přenáší ze snímače síly, z něhož se pak signály generují jako data pro software LabControl 1.0.0.0. Kvůli eliminaci výše popsanych jevů byly data importovány do softwaru OriginPro 7.5, ve kterém se provedlo vyfiltrování naměřených dat. To bylo provedeno s bodovým rozsahem – 450. Pomocí vyfiltrování byl získán hladší průběh síly  $F$  v čase  $t$ . Na obr. 3.2.3.1. je znázorněn průběh naměřených dat bez vyhlazení (zelená křivka) a po vyhlazení (červená křivka).



Obr. 3.2.3.1. Porovnání naměřeného (zelená křivka) a vyhlazeného průběhu (červená křivka) u materiálu č. 2.

Jak lze také pozorovat v diagramu na obr. 3.2.3.1. u materiálů, které jsou namáhány vyššími rychlostmi deformace, se projevuje výrazná mez kluzu. Jak je již popsáno viz kapitola 2.2.1. Mez kluzu se vyhodnocuje jako střední mez kluzu  $R_{es}$ , podle vztahu:

$$R_{es} = \frac{R_{eH} + R_{eL}}{2} \quad [\text{Mpa}], \quad (14)$$

kde  $R_{eL}$  [MPa] je dolní mez kluzu a  $R_{eH}$  [MPa] je horní mez kluzu.

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad [\text{Mpa}], \quad (15)$$

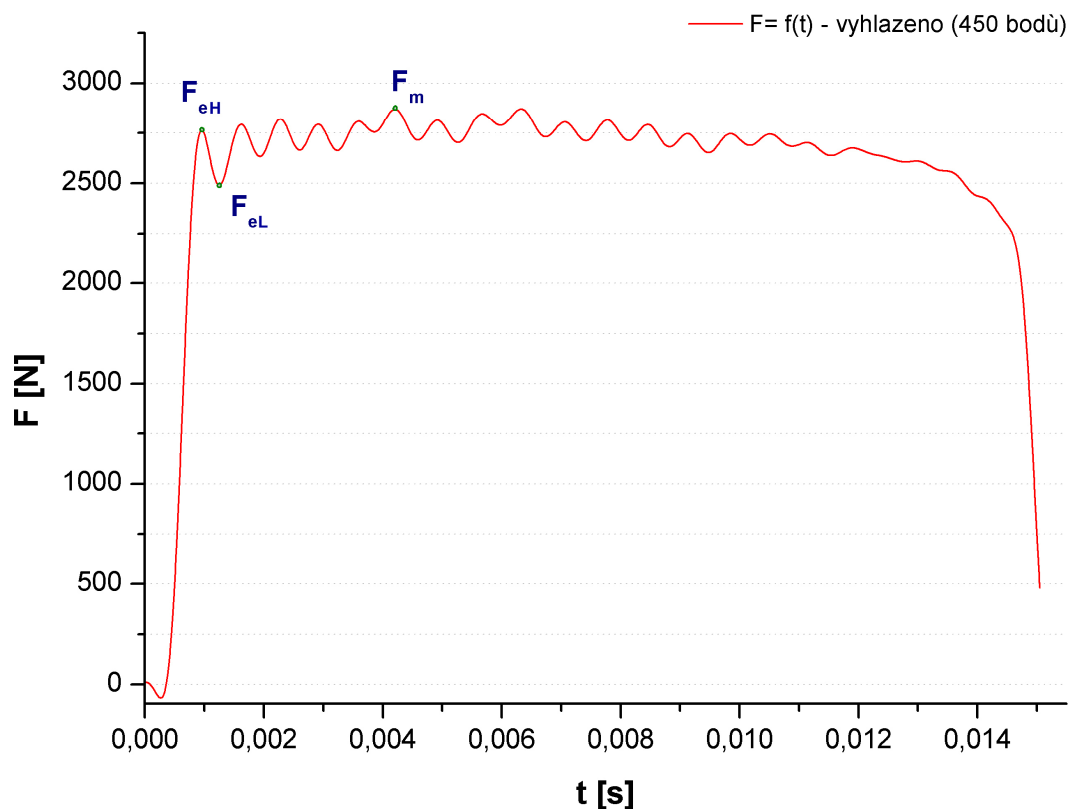
$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad [\text{Mpa}],$$

kde je  $F_{eH}$  [N] zátěžná síla odpovídající horní mezi kluzu,  $F_{eL}$  [N] je zátěžná síla odpovídající dolní mezi kluzu a  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je velikost počátečního příčného průřezu zkušební tyče.

Dále se určí mez pevnosti, která je dána vztahem:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}], \quad (16)$$

kde  $F_m$  [N] je maximální síla. Všechny výše uvedené síly jsou zakresleny viz obr. 3.2.3.2.



Obr. 3.2.3.2. Hodnoty horní meze kluzu  $F_{eH}$ , dolní meze kluzu  $F_{eL}$  a hodnota meze pevnosti  $F_m$ .

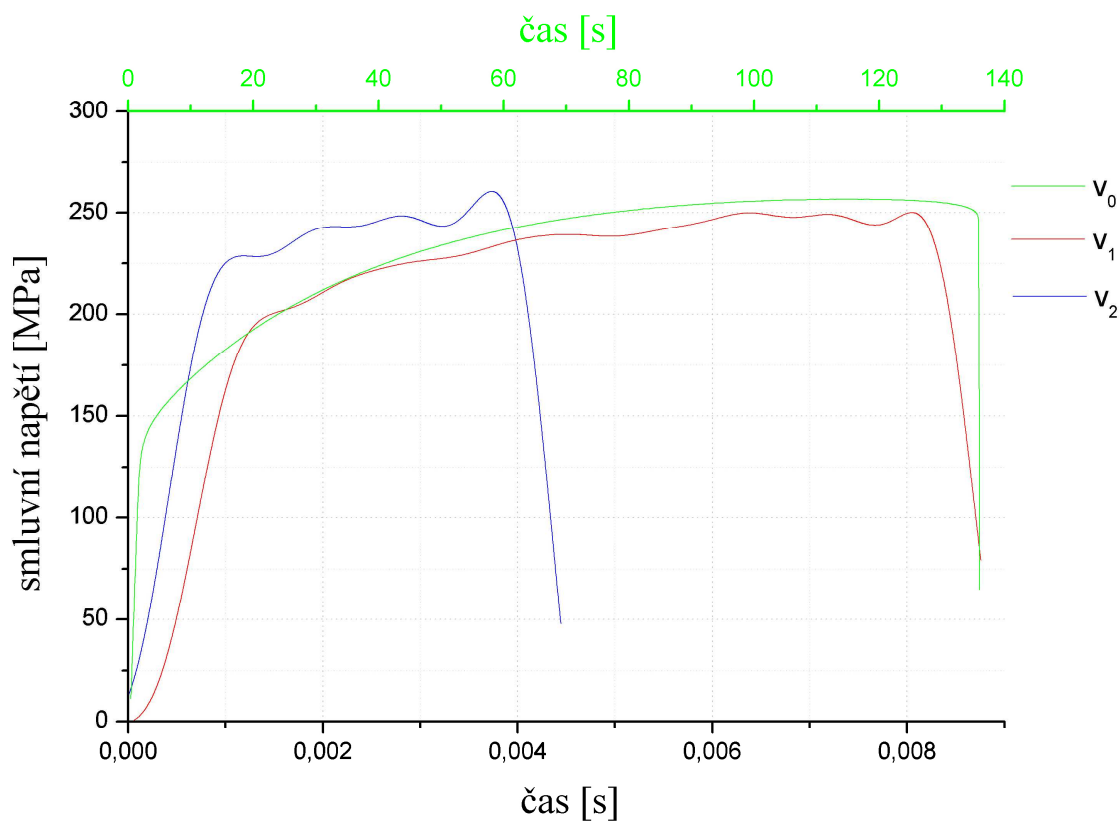
Po uskutečnění měření a následném vyhodnocení naměřených dat, byly získané výsledky zapsány do tabulek (viz tab. 3.2.4.1., 3.2.5.1., 3.2.6.1., 3.2.7.1.) a vykresleny v grafech (viz obr. 3.2.4.1., 3.2.5.1., 3.2.6.1., 3.2.7.1.), souhrnně jsou pak porovnány (viz obr. 4.1.). V tabulkách jsou uvedeny střední aritmetické průměry mechanických vlastností materiálů, spolu se směrodatnými odchylkami.

Uvedené grafy v kapitolách 3.2.4. až 3.2.7. jsou zaznamenány v závislosti smluvního napětí na čase. Časové osy jsou vyneseny dvě z důvodu rozdílných rychlostí zatěžování. Horní časová osa (zeleně) přísluší rychlosti zatěžování  $v_0$ .

**3.2.4. Měření při různých rychlostech zatížení pro materiál Al 6060***Tab. 3.2.4.1. Naměřené hodnoty tažnosti a mechanických vlastností.*

Rychlost [m.s <sup>-1</sup> ]	Označení vzorku	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	$R_{eS}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]
$v_0 = 0,00017$	$x_s$ <i>s</i>	<b>29,0</b> 0,6	<b>*141,1</b> 0,5	<b>256,9</b> 0,9
$v_1 = 2,5$	1_1	-	202,9	249,5
	1_2	-	182,1	249,4
	1_3	-	195,5	250,6
	1_4	-	203,5	249,2
$x_s$ <i>s</i>		- -	<b>196,0</b> 10,0	<b>249,7</b> 0,6
$v_2 = 2,8$	1.1_1	-	199,9	244,1
	1.1_2	-	211,2	246,6
	1.1_3	-	216,7	260,8
	1.1_4	-	215,9	258,5
$x_s$ <i>s</i>		- -	<b>210,9</b> 7,7	<b>252,5</b> 8,4

\* Tato hodnota meze kluzu je určena pomocí statické zkoušky tahem a to jako  $R_{p0,2}$ .



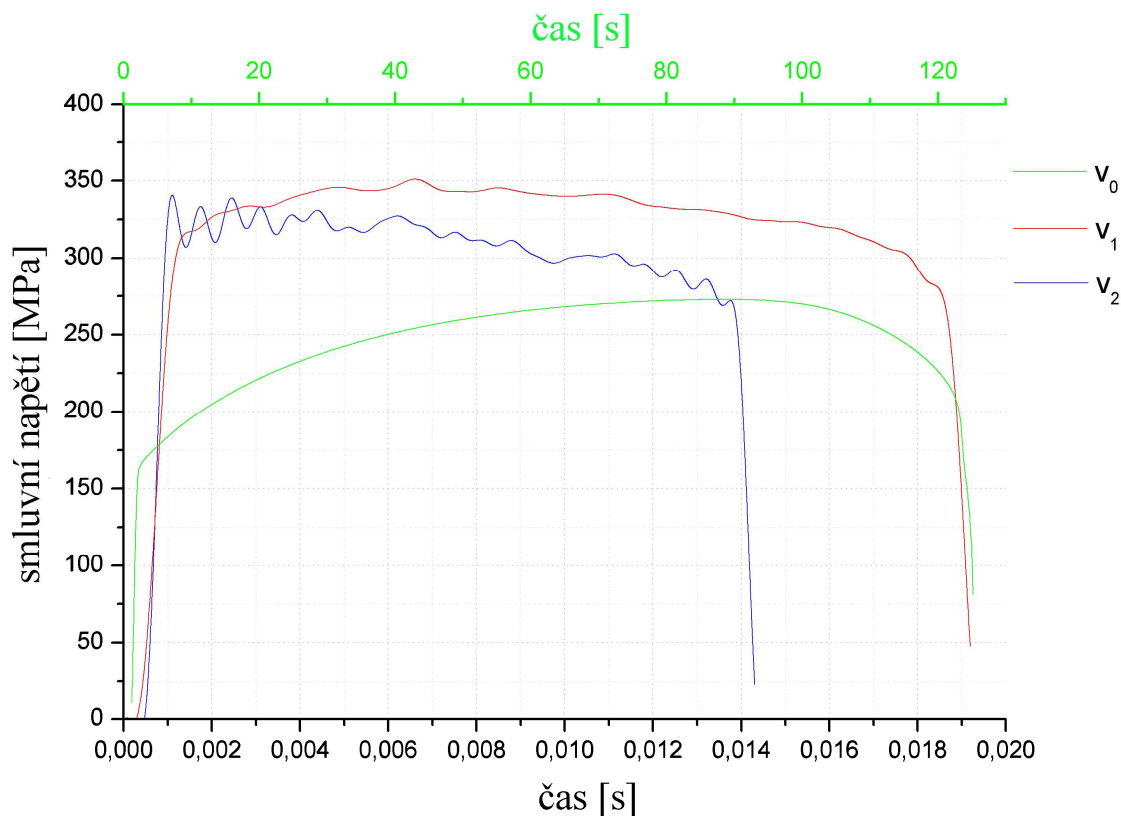
Obr. 3.2.4.1. Průběh smluvního napětí v závislosti na čase při rychlostech zatížení  $v_0$ ,  $v_1$  a  $v_2$  pro materiál č. 1.

Při měření mechanických vlastností za vyšších rychlostí deformace došlo k navýšení meze kluzu, konkrétně při měření rychlosti  $v_2$  o 70 MPa, to odpovídá 50 %. Mez pevnosti se při zkoušení za vyšších rychlostí deformace oproti očekávání snížila, konkrétně při měření rychlostí  $v_1$  o 7 MPa, tj. o 3 %.

**3.2.5. Měření při různých rychlostech zatížení pro materiál****DX54 DZ100***Tab. 3.2.5.1. Naměřené hodnoty tažnosti a mechanických vlastností.*

Rychlost [m.s <sup>-1</sup> ]	Označení vzorku	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	$R_{eS}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]
$v_0 = 0,00017$	$x_s$ s	<b>30,9</b> 0,2	<b>*169,5</b> 4,0	<b>275,0</b> 3,2
$v_1 = 2,5$	2_1	-	327,0	357,9
	2_2	-	310,6	352,9
	2_3	-	298,4	343,6
	2_4	-	304,3	350,5
$x_s$ s		- -	<b>310,1</b> 12,3	<b>351,2</b> 6,0
$v_2 = 2,8$	2.1_1	-	302,6	352,9
	2.1_2	-	323,6	341,1
	2.1_3	-	310,4	354,2
	2.1_4	-	324,2	341,3
$x_s$ s		- -	<b>315,2</b> 10,5	<b>347,4</b> 7,2

\* Tato hodnota meze kluzu je určena pomocí statické zkoušky tahem a to jako  $R_{p0,2}$ .



Obr. 3.2.5.1. Průběh smluvního napětí v závislosti na čase při rychlostech zatížení  $v_0$ ,  $v_1$  a  $v_2$  pro materiál č. 2.

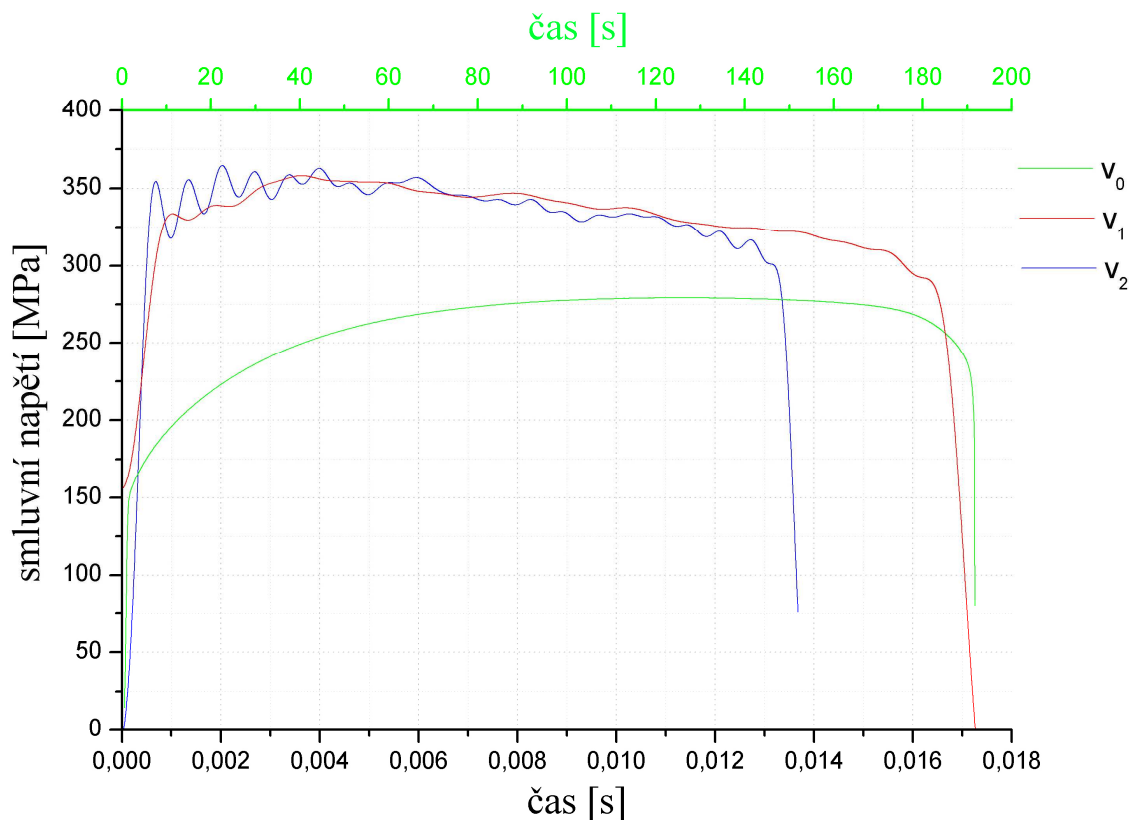
Při měření mechanických vlastností za vyšších rychlostí deformace došlo k výraznému navýšení meze kluzu, konkrétně při měření rychlosti  $v_2$  o 146 MPa, to odpovídá 86 %. Mez pevnosti se při zkoušení za vyšších rychlostí deformace také navýšila, ale znatelně méně než tomu bylo u meze kluzu, konkrétně při měření rychlostí  $v_1$  o 76 MPa, tj. o 28 %.

**3.2.6. Měření při různých rychlostech zatížení pro materiál****DC05B SBV – 15***Tab. 3.2.6.1. Naměřené hodnoty tažnosti a mechanických vlastností.*

Rychlost [m.s <sup>-1</sup> ]	Označení vzorku	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	$R_{eS}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]
$v_0 = 0,00017$	$x_s$ <i>s</i>	<b>45,2</b> 0,3	<b>*160,0</b> 2,1	<b>280,1</b> 2,0
$v_1 = 2,5$	3_1	-	362,1	391,9
	3_2	-	318,6	356,0
	3_3	-	310,2	356,9
	3_4	-	332,3	359,5
$x_s$ <i>s</i>		- -	<b>330,8</b> 22,8	<b>366,1</b> 17,3
$v_2 = 2,8$	3.1_1	-	331,5	356,8
	3.1_2	-	336,7	369,8
	3.1_3	-	336,2	365,2
	3.1_4	-	336,6	365,5
$x_s$ <i>s</i>		- -	<b>335,3</b> 2,5	<b>364,3</b> 5,5

\* Tato hodnota meze kluzu je určena pomocí statické zkoušky tahem a to jako  $R_{p0,2}$ .





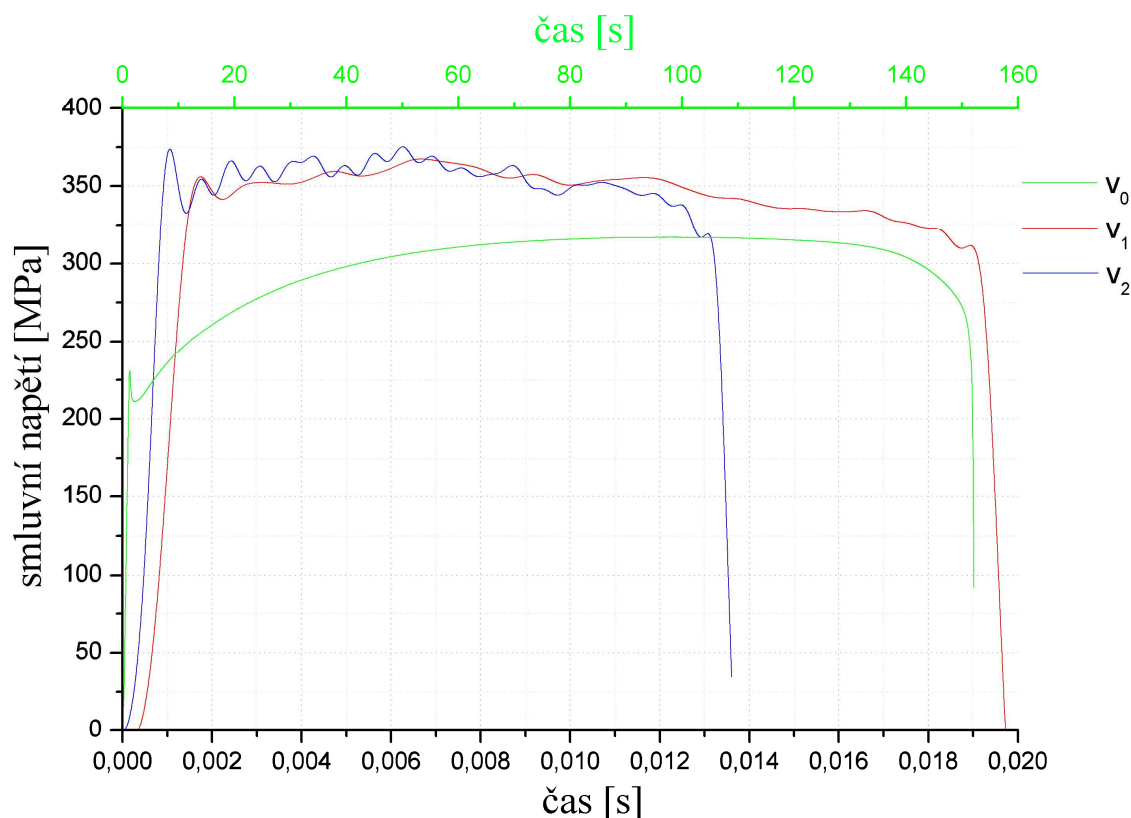
Obr. 3.2.6.1. Průběh smluvního napětí v závislosti na čase při rychlostech zatížení  $v_0$ ,  $v_1$  a  $v_2$  pro materiál č. 3.

Při měření mechanických vlastností za vyšších rychlostí deformace došlo k velmi výraznému navýšení meze kluzu, konkrétně při měření rychlosti  $v_2$  o 175 MPa, to odpovídá téměř 110 %. Mez pevnosti se při zkoušení za vyšších rychlostí deformace také navýšila, ale znatelně méně než tomu bylo u meze kluzu, konkrétně při měření rychlosti  $v_1$  o 86 MPa, tj. o 31 %.

**3.2.7. Měření při různých rychlostech zatížení pro materiál****H180 BD+Z***Tab. 3.2.7.1. Naměřené hodnoty tažnosti a mechanických vlastností.*

Rychlost [m.s <sup>-1</sup> ]	Označení vzorku	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	$R_{eS}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]
$v_0 = 0,00017$	$x_s$ <i>s</i>	<b>36,0</b> 1,0	<b>*213,4</b> 2,5	<b>318,1</b> 2,4
$v_1 = 2,5$	4_1	-	348,7	367,7
	4_2	-	349,1	368,3
	4_3	-	352,9	373,1
	4_4	-	353,3	372,7
$x_s$ <i>s</i>		- -	<b>351,0</b> 2,4	<b>370,5</b> 2,8
$v_2 = 2,8$	4.1_1	-	350,9	373,6
	4.1_2	-	350,8	371,9
	4.1_3	-	351,6	372,9
	4.1_4	-	351,6	372,6
$x_s$ <i>s</i>		- -	<b>351,3</b> 0,4	<b>372,7</b> 0,7

\* Tato hodnota meze kluzu je určena pomocí statické zkoušky tahem a to jako  $R_{p0,2}$ .



Obr. 3.2.7.1. Průběh smluvního napětí v závislosti na čase při rychlostech zatížení  $v_0$ ,  $v_1$  a  $v_2$  pro materiál č. 4.

Při měření mechanických vlastností za vyšších rychlostí deformace došlo k výraznému navýšení meze kluzu, konkrétně při měření rychlosti  $v_2$  o 138 MPa, to odpovídá 65 %. Mez pevnosti se při zkoušení za vyšších rychlostí deformace také navýšila, ale znatelně méně než tomu bylo u meze kluzu, konkrétně při měření rychlostí  $v_2$  o 54 MPa, tj. o 17 %.



## 4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

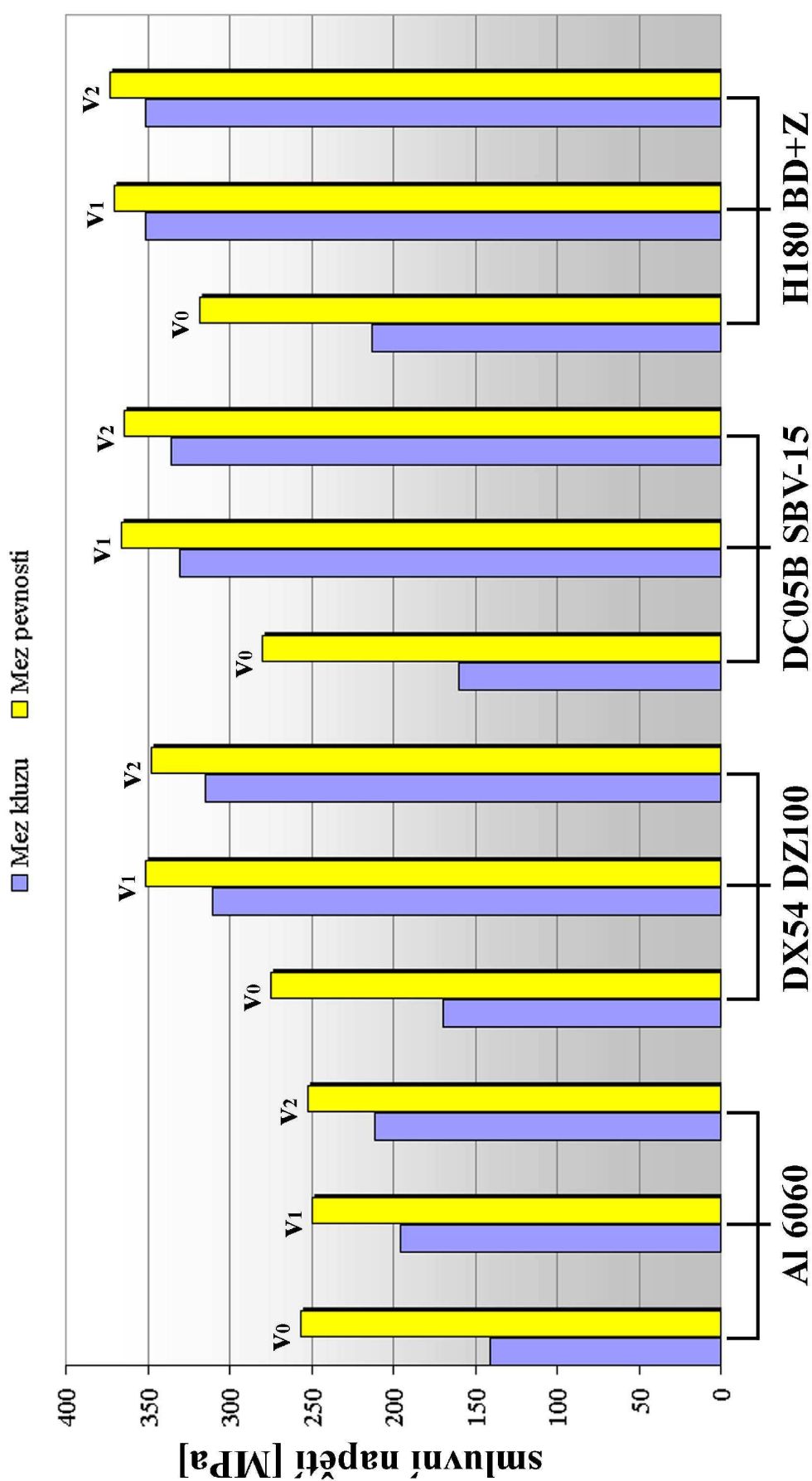
V kapitolách 3.2.4. až 3.2.7. bylo provedeno dílčí vyhodnocení pro jednotlivé materiály. Získané výsledky jsou pro názornost graficky znázorněny na obr. 4.1. Dále jsou zde uvedeny procentuální nárůstky středních hodnot mechanických vlastností, viz tab. 4.1. a obr. 4.2. Získané výsledky ze statické zkoušky tahem jsou brány jako 100 %.

Z výsledků měření při rychlostech  $v_1$  a  $v_2$ , je zřejmé, že se u materiálů neprojevuje příliš značné navýšení napětí na mezi pevnosti. V případě materiálu č. 4 (H180 BD+Z) je menší nárůst napětí na mezi pevnosti, než je tomu u materiálu č. 2 (DX54 DZ100) a č. 3 (DC05B SBV-15). Materiál č. 4 je pevnější zhruba o 40 MPa oproti materiálům č. 2 a č. 3 (podle výsledků ze statické zkoušky). Tento materiál je od předchozích dvou odlišný. Jedná se o materiál vykazující tzv. BH efekt.

Při vyhodnocení meze kluzu, lze obecně říci, že vzniklo značné navýšení napětí na mezi kluzu u zkoušek provedených vyššími rychlostmi deformace oproti statické zkoušce tahem. K nejvyššímu nárůstu meze kluzu došlo u materiálu č. 3 (DC05B SBV-15), téměř o 110 %.

Při vyhodnocení meze pevnosti, došlo u jednoho z materiálů, konkrétně materiál č. 1 (Al 6060) ke snížení meze pevnosti u zkoušek provedených za vyšších rychlostí deformace. U ostatních materiálů došlo k navýšení napětí na mezi pevnosti u zkoušek provedených vyššími rychlostmi. Navýšení meze pevnosti však nebylo tak značné, jako navýšení meze kluzu. K nejvyššímu nárůstu meze pevnosti došlo u materiálu č. 3 (DC05B SBV-15), téměř o 31 %.

Tažnost se u zkoušek za vyšších rychlostí nepodařila naměřit, z důvodu praskání zkušebních tyčí mimo rozsah orýsování. Jsou tedy známy pouze tažnosti provedené pomocí statické tahové zkoušky.

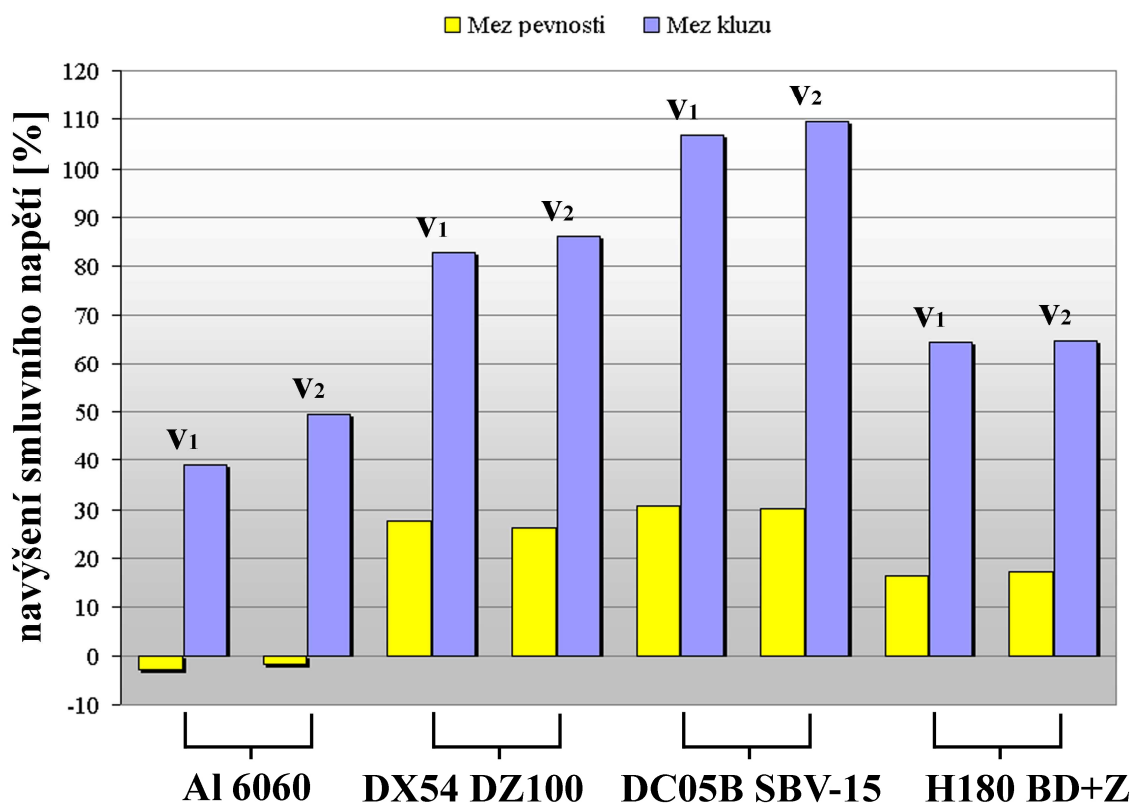


Obr. 4.1. Přehled mechanických vlastností podle materiálu a příslušné rychlosti.



Tab. 4.1. Změny mechanických vlastností podle materiálu a příslušné rychlosti  
(100 % odpovídá statické zkoušce tahem dle ČSN EN 10002-1).

Materiál	Rychlost	Navýšení $R_{eS}$ [%]	Navýšení $R_m$ [%]
Al 6060	$v_1$	38,9	-2,8
	$v_2$	49,5	-1,7
DX54 DZ100	$v_1$	82,9	27,7
	$v_2$	86,0	26,3
DC05B SBV – 15	$v_1$	106,8	30,7
	$v_2$	109,5	30,1
H180 BD+Z	$v_1$	64,5	16,5
	$v_2$	64,6	17,2



Obr. 4.2. Změny mechanických vlastností podle materiálu a příslušné rychlosti  
(100 % odpovídá statické zkoušce tahem dle ČSN EN 10002-1).



## 5. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zhodnocení tvařitelnosti tenkých plechů při vyšších rychlostech deformace a určení vlivu rychlosti zatěžování na základní mechanické vlastnosti materiálů.

Pro experimentální měření byly vybrány čtyři plechy Al 6060, DX54 DZ100, DC05B SBV-15 a H180 BD+Z. Dále byly použity tři zatěžovací rychlosti  $v_0 = 0,00017 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $v_1 = 2,5 \text{ m.s}^{-1}$  a  $v_2 = 2,8 \text{ m.s}^{-1}$ . Základní mechanické vlastnosti všech čtyř materiálů byly ověřeny pomocí statické zkoušky tahem (odpovídá rychlosti  $v_0 = 0,00017 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Nejprve byla provedena statická zkouška tahem (rychlost  $v_0$ ) a poté se provedly zkoušky za vyšších rychlostí deformace (rychlosti  $v_1$  a  $v_2$ ). Výstupními hodnotami z obou zkoušek byl průběh působící síly na čas. Vzájemně však tyto průběhy nelze porovnat, z důvodu použití rozdílných rozměrů (průřezů) zkušebních vzorků (zkušebních tyčí). Z těchto důvodů byly grafy (viz obr. 3.2.4.1., 3.2.5.1., 3.2.6.1., 3.2.7.1.) vypracovány v závislosti smluvního napětí na čas. Pak se mohly objektivně porovnat hodnoty ze statické zkoušky tahem spolu s hodnotami ze zkoušky provedené za vyšších rychlostí.

Z uvedeného vyhodnocení výsledků, viz kapitola 4. vyplývá, že s rostoucí rychlostí zatěžování došlo k navýšení meze pevnosti u všech měřených materiálů, kromě materiálu Al 6060. Dále je možné se domnívat, že s rostoucí mezí pevnosti materiálů se vliv rychlosti zatěžování eliminuje. Tzn., že u materiálů s vyšší mezí pevnosti nedochází k tak výraznému zvýšení této hodnoty vlivem vyšší rychlosti zatěžování. Tento závěr však na základě získaných výsledků nelze zobecnit a lze předpokládat, že toto tvrzení bude platit pouze při tomto charakteru zatěžování zkušebních těles.

Velmi výrazně se vliv rychlosti zatěžování projevil na hodnotách meze kluzu. U všech zkoušených materiálů lze pozorovat velmi výrazný nárůst napětí na mezi kluzu. Lze tedy obecně říci, že s rostoucí rychlostí zatěžování mez kluzu roste mnohem výrazněji než mez pevnosti. Získaný závěr je v souladu s literárními prameny [2, 9]. Nevyřešeným problémem u použitého způsobu měření je určování hodnot tažnosti materiálů. Ty se v práci nepodařilo korektně zjistit.



Pro zpřesnění hodnot by bylo vhodné provést více zkoušek, pro jednotlivý materiál a příslušnou rychlost zkoušení a navrhnout způsob pro vyhodnocování tažnosti materiálů. Např. použitím optických bezkontaktních měřících systémů.

Výsledné hodnoty mechanických vlastností by bylo možné použít jako vstupní hodnoty pro simulační software.





## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FOREJT, M.: *Teorie tváření*, VUT, Brno 1992
- [2] FARLÍK, A.; ONDRÁČEK, E.: *Teorie dynamického tváření*, SNTL, Praha 1968.
- [3] PETRUŽELKA, J.: *Nekonvenční metody tváření*, VŠB, Ostrava 2007
- [4] TMĚJ, J.; MIKEŠ, V.: *Teorie tváření*. VŠST, Liberec 1990.
- [5] ČSN – EN 10002-1. *Kovové materiály*. Statická zkouška tahem, 2002.
- [6] Mechanické vlastnosti [online]. Dostupný z [www](http://www.ateam.zcu.cz/):  
< <http://www.ateam.zcu.cz/> >, 18. 5. 2009.
- [7] Crash Test [online]. Dostupný z [www](http://www.auto.cz/): < <http://www.auto.cz/> >, 16. 5. 2009.
- [8] BILLY, J.: Trendy vývoja ocelových plechov pre ľahké automobilové konštrukcie. *Hutnické listy*, 1999, roč. 54., č. 3.
- [9] DOUBEK, P.: *Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace*. [Disertační práce], TUL, Liberec 2006.
- [10] Vysokopevnostní materiály [online]. Dostupný z [www](http://www.ksp.tul.cz/):  
< <http://www.ksp.tul.cz/> >, 15. 5. 2009.
- [11] Slitiny [online]. Dostupný z [www](http://www.alcan.cz/): < <http://www.alcan.cz/> >, 20. 5. 2009.
- [12] Deep drawing steels [online]. Dostupný z [www](http://www.thyssenkrupp-steel.com/):  
< <http://www.thyssenkrupp-steel.com/> >, 20. 5. 2009.
- [13] FÜRBAKER, I.: *Lexikon ocelí*. Praha: Dashöfer, 2006.
- [14] HORNÍK, P.: *Vypracování metodiky zkoušení mechanických vlastností plechů při vyšších rychlostech deformace*. [Diplomová práce], TUL, Liberec 2008.



## **7. SEZNAM PŘÍLOH**

### **PŘÍLOHA 1**

Protokoly o provedení statické zkoušky tahem.

### **PŘÍLOHA 2**

Fotodokumentace zařízení.



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

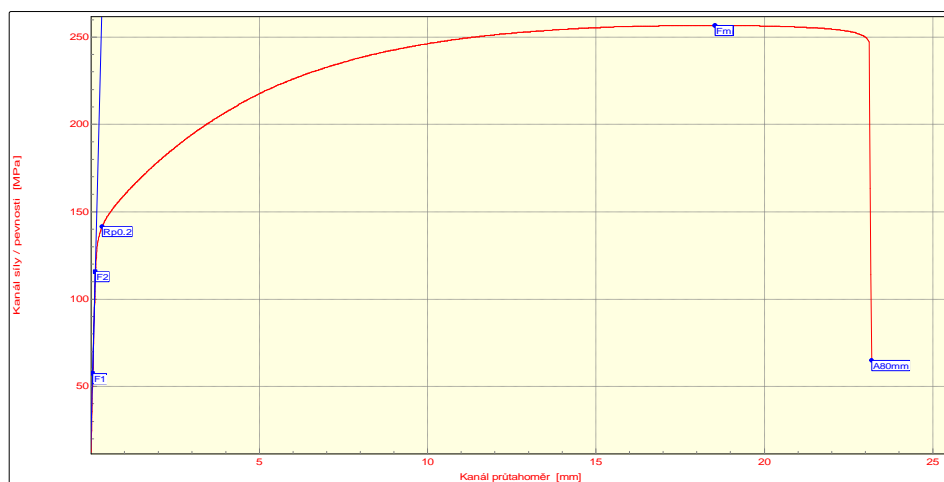
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : Al 6060  
Norma: : ČSN - EN 10002-1  
Rozměr vzorku: : (1 x 20) mm  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min  
Vypracoval: : Michal Gult  
Datum zkoušky: : 15.4.2009  
Směr odebrání vzorku: : 0°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F <sub>m</sub> N	A <sub>80mm</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	5577.80	28.90	141.43	256.69
2	5564.70	28.66	140.48	256.09
3	5569.50	29.34	140.73	256.31
4	5618.40	28.17	141.31	258.56
5	5571.00	28.57	140.76	256.38
6	5598.40	30.03	142.03	257.64
7	5578.70	29.03	141.13	256.73

Statistická hodnota	F <sub>m</sub> N	A <sub>80mm</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
Počet zkoušek	7	7	7	7
Průměrná hodnota	5582.64	28.96	141.12	256.91
Směrodatná odchylka	19.13	0.60	0.53	0.88



### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX54DZ100

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

Vypracoval: : Michal Gult

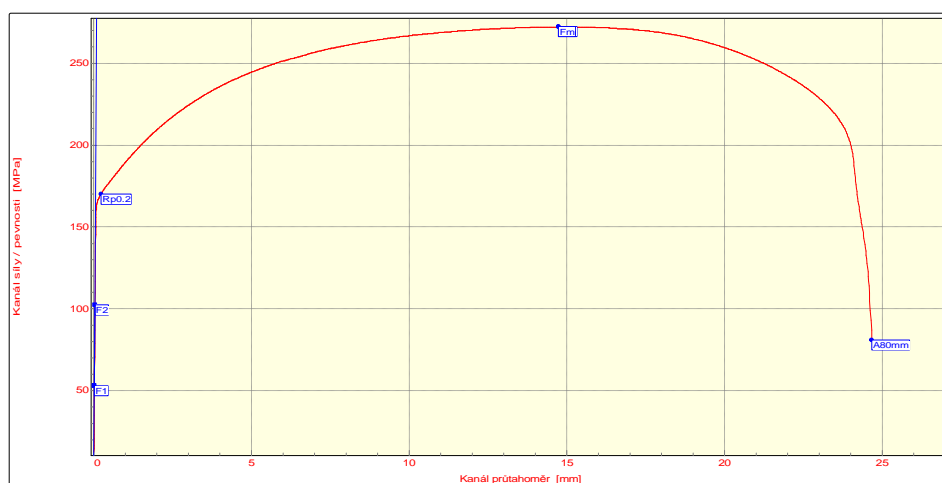
Datum zkoušky: : 15.4.2009

Směr odebrání vzorku: : 0°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F <sub>m</sub> N	A <sub>B0mm</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	4433.70	30.82	170.18	272.19
2	4521.00	31.13	167.68	277.55
3	4430.20	30.77	167.30	271.97
4	4521.00	31.12	166.06	274.16
5	4433.70	30.80	176.05	279.08

Statistická hodnota	F <sub>m</sub> N	A <sub>B0mm</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	4467.92	30.93	169.45	274.99
Směrodatná odchylka	48.48	0.18	3.98	3.20



### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DC05BSBV-15

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

Vypracoval: : Michal Gult

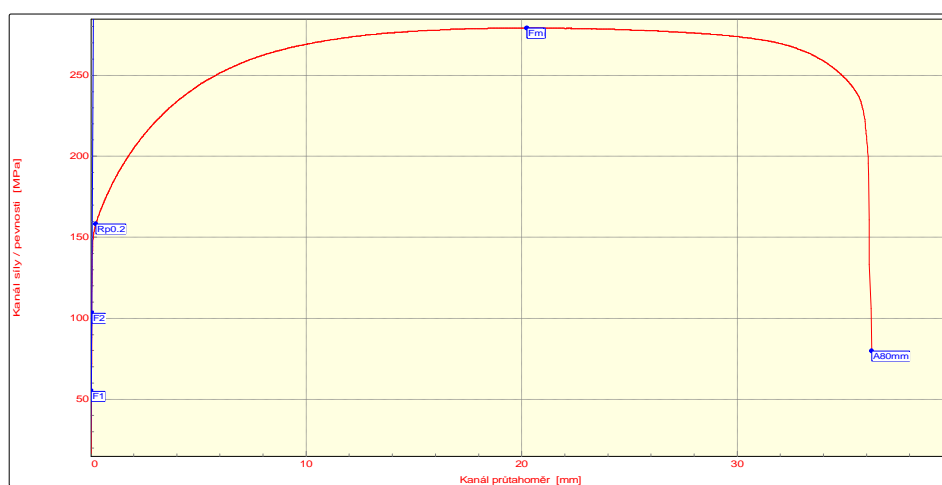
Datum zkoušky: : 15.4.2009

Směr odebrání vzorku: : 0°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F <sub>m</sub> N	A <sub>B0mm</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	4545.40	45.26	158.17	279.18
2	4562.10	45.08	159.33	280.21
3	4595.60	44.77	162.86	282.27
4	4589.20	45.10	162.24	281.88
5	4585.30	45.27	161.81	281.64
6	4573.50	45.81	160.45	280.91
7	4499.30	44.84	156.98	276.35
8	4537.60	45.05	158.49	278.70

Statistická hodnota	F <sub>m</sub> N	A <sub>B0mm</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
Počet zkoušek	8	8	8	8
Průměrná hodnota	4561.00	45.15	160.04	280.14
Směrodatná odchylka	32.38	0.32	2.14	1.99



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

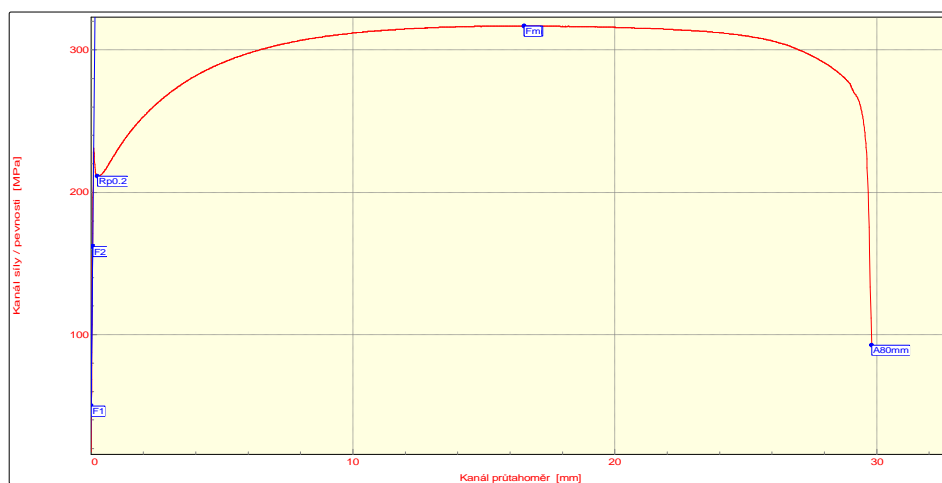
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : H 180 BD+Z  
Norma: : ČSN - EN 10002-1  
Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min  
Vypracoval: : Michal Gult  
Datum zkoušky: : 15.4.2009  
Směr odebrání vzorku: : 0°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	F <sub>m</sub> N	A <sub>B0mm</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	4842.80	37.21	211.24	316.86
2	4904.60	36.67	215.64	320.91
3	4826.80	37.03	211.82	315.82
4	4867.90	36.49	214.29	318.51
5	4903.90	35.81	216.41	320.86
6	4895.10	34.87	216.26	320.28
7	4831.20	35.07	211.29	316.10
8	4816.20	35.00	210.42	315.12

Statistická hodnota	F <sub>m</sub> N	A <sub>B0mm</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
Počet zkoušek	8	8	8	8
Průměrná hodnota	4861.06	36.02	213.42	318.06
Směrodatná odchylka	36.54	0.96	2.49	2.39



### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



*Obr. 1. Zkušební zařízení v dílnách Katedry strojírenské technologie.*

### **Prohlášení:**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 5. června 2009

.....  
Michal Gult



### **Declaration:**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 5. June 2009

.....  
Michal Gult